

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Ari Haavisto

KESTOMAGNETOIDUN AKSIAALIVUOMOOTTORIN LÄMPENEMÄN
MALLINTAMINEN

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 10.1.2006

Työn valvoja Professori Antero Arkkio

Työn ohjaaja TkT Jussi Lähteenmäki

Tekijä:	Ari Haavisto	
Työn nimi:	Kestomagnetoidun aksiaalivuomoottorin lämpenemän mallintaminen	
Päivämäärä	10.1.2006	Sivumäärä: 60
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikka	
Professuuri	S-17 Sähkötekniikka (Sähkömekaniikka)	
Työn valvoja:	Professori Antero Arkkio	
Työn ohjaaja:	TkT Jussi Lähteenmäki	
<p>Työn tavoitteena oli laatia dynaaminen lämpömalli kestopagnetoidulle aksiaalivuomoottorille. Mallin avulla voi mitoittaa kyseistä moottorityyppejä ja suunnitella sille uudenlaisia jäähdytysratkaisuja.</p> <p>Malli on lämpöverkko, jonka komponentit on ratkaistu kirjallisuuteen perustuen. Häviöt ja niiden jakaantuminen koneen osiin oletetaan tunnetuksi. Mallissa olevat lämpökapasitanssit mahdollistavat mallin käytön myös jaksollisessa käytössä. Jako kuuteen erilliseen lohkoon mahdollistaa epäsymmetristen rakenteiden ja jäähdytyksen tutkimisen.</p> <p>Malli ratkaistaan APLAC[®] -piirisimulaattorilla tai Matlab[®] -ohjelmistolla. Lämmönsiirtymiskertoimien määrittäminen on tehty lämpenemämittausten avulla. Ulkoisen puhaltimen vaikutus on kokeiltu mittauksin ja mallintaen. Mallin avulla on tarkasteltu myös häviöissä, ilmavirroissa ja lämmönsiirtymiskertoimissa olevien epätarkkuuksien vaikutusta käämityksen sekä muiden osien lämpötilaan.</p> <p>Laadittu malli ei vaadi suurta laskentatehoa, joten se toimii nopeasti mikrotietokoneissa. Se on helposti sovellettavissa ja muokattavissa erilaisiin moottorin rakenneratkaisuihin.</p>		
Avainsanat:	lämpöverkko, lämpömalli, kestopagneettimoottori, aksiaalivuomoottori	

Author:	Ari Haavisto	
Name of the thesis:	A Thermal Model for an Axial-Flux Permanent Magnet Machine	
Date:	10 January 2006	Number of pages: 60
Department:	Electrical and Communications Engineering	
Professorship	S-17 Electrical Engineering (Electromechanics)	
Supervisor:	Professor Antero Arkkio	
Instructor:	Jussi Lähteenmäki, DrSc(Tech)	
<p>The aim of this study was to design a dynamic thermal model for axial-flux permanent magnet machine. The model can be used to design new cooling methods and constructions for this machine type.</p> <p>The model is a thermal network whose components are mainly based on the evidence of existing literature. The power losses in each part of the machine were assumed to be known. The dynamic model can be used to simulate cyclic loading and transient action. The thermal network is divided into six sectors, thereby enabling analysis of an asymmetric cooling system and construction.</p> <p>The model can be realised using either an APLAC® circuit simulator or Matlab® software. The heat transfer coefficients are defined from measured data. The effect of external ventilation is examined with measurements and modelling. The model also examines the effect of variation in parameters on thermal behaviour. Critical parameters are defined.</p> <p>The constructed model requires no heavy computing and runs efficiently on a microcomputer. The model can be modified and applied to different machine constructions.</p>		
Keywords:	thermal network, thermal model, permanent magnet machine, axial-flux machine	

ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osastolla sähkömekaniikan laboratoriossa. Lämpömallinnus ja virtaustekniikka olivat aikaisemmin itselleni vieraita tieteenaloja. Kiitän kaikkia tutkijoita, sekä entisiä ja nykyisiä työtovereitani saamistani neuvoista.

Erityisesti osoitan kiitokseni työryhmäni jäsenille emeritusprofessori Tapani Jokiselle ja laboratorioinsinööri Jarmo Perholle, joilta sain materiaalia ja kävin heidän kanssaan antoisia keskusteluja. Kiitän työn valvojaa professori Antero Arkkiota, ohjaajaa TkT Jussi Lähteenmäkeä ja kuvat puhtaaksi piirtänyttä Petri Koskea. Mittausjärjestelyt onnistuivat yhdessä DI Pekka Lehtiön kanssa, josta hänelle kiitokseni.

Espoossa 10. tammikuuta 2006

Ari Haavisto

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT.....	3
ALKULAUSE.....	4
SYMBOLI JA LYHENNELUETTELO.....	6
1. JOHDANTO.....	10
1.1 Tavoite.....	10
2. KIRJALLISUUSKATSAUS.....	11
3. LÄMMÖNSIIRTO JA HÄVIÖT.....	12
3.1 Lämpövirtaus.....	12
3.2 Lämmön siirtyminen ilmaan.....	13
3.2.1 Konvektio.....	13
3.2.2 Säteily.....	14
3.3 Verkon ratkaisu.....	15
3.4 Ohjatut jännitelähteet.....	16
3.4.1 Ilmanvirtauksen vaikutus.....	16
3.4.2 Ohjatut jännitelähteet solmupistematriisissa.....	18
3.5 Muutostilojen laskenta.....	20
4. LÄMPÖMALLI.....	22
4.1 Staattorin malli.....	23
4.2 Roottorin malli.....	32
4.3 Rungon lämpöverkko.....	38
4.4 Häviötehot.....	44
4.5 Lämpömallin ratkaisu.....	45
5. MITTAUKSET.....	46
5.1 Häviömittaukset.....	46
5.2 Kuormituskoe.....	47
6. LASKETTUIJEN JA MITATTUIJEN LÄMPENEMIEN VERTAILU.....	48
6.1 Pysyvän tilan lämpenemäerot ilman tuuletusta.....	48
6.2 Pysyvän tilan lämpenemäerot ulkopuolisella tuuletuksella.....	50
6.3 Lämpenemän nousu käynnistyksen jälkeen.....	53
6.4 Herkkyystarkastelu.....	55
7. YHTEENVETO.....	57
LÄHDEVIITTEET.....	59
LIITTEET	
Liite 1: Materiaalitietoja	
Liite 2: Lämpötilojen mittauspisteet testikoneessa	
Liite 3: Luettelo lämmönsiirtymiskertoimista	
Liite 4: Lämpöverkon kytkentäkaavio	

Symboli ja lyhenneluettelo

Symbolit

A	poikkipinta-ala
α	lämmönsiirtymiskerroin
b	vahvuus, väli
β	kaasun lämpölaajenemiskerroin
C	kapasitanssi
c_p	ominaislämpökapasiteetti
γ	sähkönjohtavuus
d	halkaisija
δ	ilmavälin pituus, eristeen vahvuus
ε_r	suhteellinen säteilykerroin
ED 75%	ajoittaiskäyttö ja ajoittaiskäyttökerroin
f_{fe}	täytekerroin
G	konduktanssi
g	putoamiskiihtyvyys
Gr	Grashofin luku
h	korkeus
I	sähkövirta
θ	lämpenemä, lämpötilaero
J	sähkövirran tiheys
k_1	vyyhdempääeristeen pinta-alan korjauskerroin
λ	lämmönjohtavuus
l	pituus

m	massa
N	laskentalohkojen lukumäärä, muu lukumäärä indeksoitu
Nu	Nusseltin luku
ν	kaasun kinemaattinen viskositeetti
P	häviöteho, lämpövirta
Q	uraluku
q	kaasun tilavuusvirta, lämpövirran tiheys
Pr	Prandtlin luku
R	resistanssi, lämpöresistanssi
Re	Reynoldsin luku
ρ	tiheys
σ	Stefan-Boltzmannin vakio
T	lämpötila
T_{∞}	kaasun lämpötila pienen etäisyyden päässä pinnasta
Ta	Taylorin luku
u	ilman virtausnopeus
U	jännite
x	karakteristinen pituus
V	tilavuus
w	leveys

Lämpöverkon solmupisteet

$Ai...Fi$	solmupiste laskentalohkoittain, i on numero
nFi	rungossa oleva solmupiste
RTi	roottorissa oleva solmupiste
$AG1$	ilmavälissä oleva solmupiste

Vpi sisemmän vyyhdenpään ilmatilan solmupiste

Vpo ulomman vyyhdenpään ilmatilan solmupiste

Alaindeksit

0 magneetin mitta

1 viittaa yleensä staattorin suureeseen

2 viittaa yleensä roottorin suureeseen

Al alumiini

AF vyyhdenpääilman- ja rungon välinen suure

av average, keskiarvosuure

c convection, konvektiota koskeva suure

Cu kupari

end loppuarvo

Fe rauta, teräs

Fr frame, runkoon viittaava suure

i inner, sisäkehän suure

o outer, ulkokehän suure

J jarrua koskeva suure

KP kiinnityspalaan liittyvä suure

p levysydämeen liittyvä suure

PM kestopagneettiin liittyvä suure

R roottorin komponentti

r radiation, säteilyä koskeva suure

res resultoiva suure

S staattorin komponentti

s solid, kiinteää ainetta koskeva tai sähköinen suure

SF	rungon komponentti
SL	suoja levyä koskeva suure
uer	uraeristettä koskeva suure
th	thermal, terminen suure
z	hammas
zd	hampaan pää
yo	yoke, staattorin selkä
VP	magneettien kehyslevyä koskeva suure
Vpi	sisemmän vyyhdenpään alueella oleva suure
Vpo	ulomman vyyhdenpään alueella oleva suure

1. Johdanto

Hidaskäyntisten kestopagnetoitujen sähkömoottoreiden kehitys on ollut nopeaa voimakkaiden Neodyymi-Rauta-Boori (Nb-Fe-B) magneettien tultua markkinoille 80-luvulla. Kestomagneeteilla voidaan tehdä moninapaisia ja vääntömomentiltaan voimakkaita tahtimoottoreita. Tällöin erillistä, huoltoa ja tilaa vaativaa alennusvaihdetta ei tarvita ja moottori voidaan helposti integroida osaksi työkonetta. Kestomagneettimoottoria syötetään useimmiten taajuusmuuttajalla, jolloin käynnistys sekä pyörimisnopeuden muutos tehdään taajuutta muuttamalla. Tällaisella koneella myös hyötysuhde sekä tehokerroin ovat parempia kuin oikosulkumoottorilla. Kestomagneettimoottoreita on alettu käyttää erilaisissa säädetyissä käytöissä, esimerkiksi hissi, tuulimylly ja autosovelluksissa korvaamaan huoltoa vaativa tasavirtamoottori sekä vaihteisto.

Aksiaalivuokoneeksi kutsutaan sähkökonetta, jonka ilmapälissä oleva magneettivuo on akselin suuntainen. Tällaisessa konetyypissä on levymäinen roottorikiekko, joka pyörii vasten staattoria, kahden staattorin välissä tai kaksi roottorikiekkoa staattorin molemmin puolin. Tällaisella rakenteella voidaan tehdä akselin suunnassa hyvin lyhyt moottori, jonka pyörimisnopeus on suhteellisen pieni ja vääntömomentti suuri (Hakala 2000). Kun rakenne integroidaan työkoneseen, saadaan varsin pieneen tilaan menevä työkonetta, kuten hissikuiluun sopiva nostomoottori. Tämän tyyppisessä rakenteessa myös jäädyttävä pinta-ala on suhteellisen iso ja hyötysuhteeltaan hyvän koneen jäähtyminen voi tapahtua jopa kokonaan ilman puhallinta. Haluttaessa sähkömoottorista enemmän tehoa suhteessa fyysiseen kokoon, pitää sen jäädytykseen käyttää puhallinta. Tällöin koneen mitoituksessa pitää huomioida myös ilmavirtausten vaikutus. Perinteisiä radiaalivuokoneita on tutkittu ja optimoitu jo useiden vuosikymmenien ajan, mutta aksiaalivuokoneen osalla on vielä tarvetta lämpötekniiseen optimointiin.

1.1 Tavoite

Työn tavoitteena oli kehittää lämpömalli, jolla voidaan analyttisesti mallintaa kestopagnetoidun aksiaalivuokoneen häviöiden johtumista ulos koneesta. Häviöiden laskenta ei sisälly työhön. Tämän laskentamallin tavoitteena on myös helppo ilmavirtausten muuttelu koneen sisällä, jolloin se on kätevä työkalu oikeanlaisten jäähdytysratkaisujen suunnittelemiseksi. Lämpömallinnusta voidaan tehdä myös elementtimenetelmällä, mutta se vaatii runsaasti laskentatehoa ja -aikaa. Kyseisessä moottori-

ratkaisussa tarvittaisiin lisäksi kolmiulotteinen mallinnus. Työssä tullaan tarkastelemaan myös kriittisiä häiriötekijöitä ja mallin lähtöarvoissa esiintyvien virheiden vaikutusta moottorin lämpenemään.

2. Kirjallisuuskatsaus

Kuten aikaisemmin mainittiin, on erilaisten radiaalivuokoneiden lämpöverkoista tehty paljon tutkimustyötä ja julkaisuja. Peruseriaatteet ovat tässä konetyypissä samat, vain rakenne on erityyppinen. Oikosulkumoottorille mallia on rakennettu ja viritetty useissa lähteissä. Asiaa ovat tutkineet mm. Kaltenbacher & Saari (1992), Putkonen (1995) sekä Kylander (1995). Varsinkin suurnopeuskoneiden tuotekehityksessä on lämpömalli ollut tärkeä työkalu (1995), koska niissä tehotiheydet ja häviöt ovat merkittäviä. Ilmanvirtauksen vaikutustavoista jäähdytyksessä on tutkittu paljon mm. Gotter (1954), Incropera (1990) sekä luentomonisteissa Koziej (1989) ja Kotrba (1993). Aksiaalivuokoneiden kehitys on niin uutta, että niille laadittuja analyttisiä malleja ei juuri löydy. Tällaisia koneita on tutkinut mm. Hakala (2000), Parviainen (2005), Yang et al (2004) sekä Mbidi et al (2000). Useissa artikkeleissa todettiin käytetyn jotain lämpö- ja magneettikentän laskentaohjelmistoa, eikä niiden käyttämiä laskentaperiaatteita ole sen paremmin selvitetty.

3. Lämmönsiirto ja häviöt

3.1 Lämpövirtaus

Lämpö siirtyy ylemmästä potentiaalista alempaan kuten sähkövirta. Se voi siirtyä johtumalla, säteilemällä tai konvektiolla. Lämpöverkko koostuu tutuista virtapiirin komponenteista, joilla voidaan hyvin kuvata lämmön lähteitä, varastoitumista ja virtausta alempaan potentiaaliin. Tämä teoria perustuu enimmäkseen lähteisiin Incropera (1990) ja Gotter (1954). Kiinteässä kappaleessa lämpö siirtyy alenevan lämpötilagradientin suuntaan, jolloin lämpövirtauksen tiheyttä \vec{q} voidaan kuvata yhtälöllä

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad 3.1$$

Missä T on absoluuttinen lämpötila ja λ suhteellisuuskerroin, jota sanotaan lämmönjohtavuudeksi. Se on materiaalille ominainen suure, jonka yksikkö on W/mK. Eristeiden ja johteiden lämmönjohtavuuksia on mitattu ja taulukoitu (Gotter 1954, Koncar 1984). Sitä analogisesti vastaava suure on sähkötekniikassa sähkönjohtavuus γ . Johtavuuden avulla kappaleelle voidaan määrittää lämpöresistanssi R_{th} , kun tiedetään kappaleen pituus l ja poikkipinta-ala A .

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda} \int_0^l \frac{dx}{A(x)} \quad 3.2$$

Lämpöresistanssin yksikkö on

$$[R] = \frac{[l]}{[\lambda][A]} = \frac{m}{(W/mK)m^2} = K/W \quad 3.3$$

Ohmin laissa virta saadaan vastuksen yli olevan jännitteen avulla. Vastaavasti kahden pisteen lämpötilaero θ saa aikaan em. vastuksen R läpi lämpövirran P

$$P = \lambda \frac{A}{l} \theta = \frac{\theta}{R} \quad 3.4$$

Toisin sanoen pisteiden lämpötilaero θ saadaan häviötehon aiheuttaman lämpövirran P ja lämpöresistanssin R tulona.

$$\theta = R P \quad 3.5$$

Tällöin θ kuvaa pisteen lämpenemää ympäristöönsä nähden, jos siihen tuodaan häviöteho P ja vastus ympäristön lämpötilan tasoon on R .

Kappaleeseen sitoutuvaa lämpömäärää Q_{th} vastaa sähköisessä mallissa kondensaattorin varaus Q_s . Kappaleen lämpömäärä on

$$Q_{th} = m c_p \theta \quad 3.6$$

missä m on kappaleen massa, c_p ominaislämpökapasiteetti ja θ lämpötilaero. Tällöin kappaleen lämpökapasiteetti saadaan osan tilavuudesta tulona

$$C = c_p \rho V \quad 3.7$$

Edellä mainittujen yhtälöiden avulla voidaan yleisille sähkötekniikan ja lämpömallin suureille analogisesti määrittää vastaavuudet:

<i>Lämmönvirtaus</i>			<i>Sähkönvirtaus</i>		
Virta	P	W	Virta	I	A
Virran tiheys	q	W/m ²	Virran tiheys	J	A/m ²
Lämpötila	T	K	Potentiaali	V	V
Lämpötilaero	θ	K	Jännite	U	V
Johtavuus	λ	W/mK	Johtavuus	γ	1/Ωm
Resistanssi	R	K/W	Resistanssi	R	Ω
Kapasitanssi	C	Ws/K	Kapasitanssi	C_s	F

3.2 Lämmön siirtyminen ilmaan

3.2.1 Konvektio

Ilman virratessa pitkin kiinteää pintaa siirtyy siihen lämpöä johtumalla rajapinnan läpi. Tätä johtumista kutsutaan konvektioksi. Lämpövirran tiheys on suoraan verrannollinen lämpötilaeroon θ .

$$q_c = \alpha_c \theta \quad 3.8$$

Yhtälössä kerrointa α_c kutsutaan lämmönsiirtymiskertoimeksi, jonka yksikkö on W/m²K. Sen määrittäminen on varsin monimutkaista ja se määritetään usein kokeusperäisesti tai mittauksin. Konvektiivinen lämpöresistanssi pinnan A_c läpi voidaan laskea

$$R_{th,c} = \frac{T_s - T_\infty}{q_c A_c} = \frac{1}{\alpha_c A_c} \quad 3.9$$

jossa T_{∞} on kaasun lämpötila jonkin matkan päässä pinnasta. Lämmönsiirtymiskerroin saadaan käyttäen Nusseltin lukua Nu (Incropera 1990)

$$\alpha_c = \frac{\lambda}{x} Nu \quad 3.10$$

jossa λ on kaasun lämmönjohtavuus, Nu Nusseltin luku ja x lämpöä siirtävän pinnan karakteristinen pituus virtaussuunnassa. Nusseltin luku on dimensioton suure, joka riippuu väliaineen fyysisistä ominaisuuksista ja virtauksen nopeudesta kanavassa, joten voidaan kirjoittaa (Saari 1995)

$$Nu = f(Gr, Re, Pr) \quad 3.11$$

missä Gr on Grashofin luku, Re Reynoldsin luku ja Pr Prandtin luku. Vapaalle konvektiolle, jossa ei esiinny turbulenttista virtausta, määritellään

$$Gr = \frac{g \beta (T_s - T_{\infty}) x^3}{\nu^2} \quad 3.12$$

jossa g on putoamiskiihtyvyys, β lämpölaajenemiskerroin, x pinnan karakteristinen pituus ja ν on kaasun kinemaattinen viskositeetti (Kylander 1995). Reynoldsin luku on

$$Re = \frac{u x}{\nu} \quad 3.13$$

missä u on kaasun virtausnopeus (Incropera 1990). Prandtin luku määritellään

$$Pr = \frac{\nu \rho c_p}{\lambda} \quad 3.14$$

missä ρ on kaasun tiheys, c_p ominaislämpökapasiteetti ja λ lämmönjohtavuus. Näiden kertoimien vaikutus riippuu kaasun virtauksesta ja sitä ohjaavasta geometriasta sekä pyörteilystä. Tästä syystä jokaista erilaista geometrasta tapausta on käsiteltävä erikseen.

3.2.2 Säteily

Säteilynä siirtyvän lämpövirran tiheys on Stefan-Boltzmanin lain mukaan

$$q_r = \varepsilon_r \sigma (T_s^4 - T_{\infty}^4) \quad 3.15$$

missä ε_r on pintojen välinen suhteellinen resultoiva säteilykerroin ja σ on täysin mustan kappaleen säteilykerroin (Stefan-Boltzmannin vakio), jonka likiarvo on

$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Suhteellinen säteilykerroin riippuu pintojen laadusta ja niiden asemasta toisiinsa nähden. Eri materiaaleille on taulukoitu suhteellisia säteilykertoimia. Täysin mustalla kappaleella luku on yksi. Säteilyn lämmönsiirtymiskerroin määritellään yhtälöllä

$$\alpha_r = \frac{q_r}{(T_s - T_\infty)} = \varepsilon_r \sigma \frac{(T_s^4 - T_\infty^4)}{(T_s - T_\infty)} \quad 3.16$$

Koneen maalatun ulkokuoren ja huoneen seinien välisenä resuitoivana säteilykertoimena voidaan käyttää arvoa $\varepsilon_r = 0,85$. Jos lisäksi oletetaan kuoren ja ympäristön lämpötilaeroksi noin 40°C , voidaan lämmönsiirtymiskertoimen suuruudeksi arvioida $\alpha_r = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$. Jos huoneen seinien ja ilman lämpötila sekä konvektoiva ja säteilevä pinta-ala ovat yhtä suuret, voidaan em. konvektion ja säteilyn kertoimet laskea yhteen (Jokinen 1972). Kokonaislämmönsiirtymiskerroin on tällöin

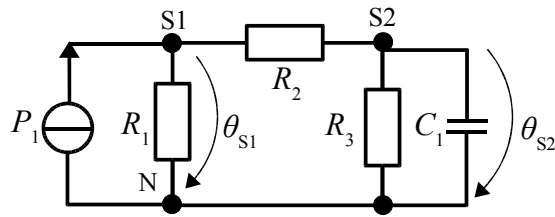
$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r \quad 3.17$$

Kokonainen lämmönsiirtymisresistanssi R pinnasta A ilmaan voidaan siis laskea, kuten konvektiolla yhtälössä (3.9).

3.3 Verkon ratkaisu

Kuten mainittiin, lämpöverkko on kuin sähköinen piiri (kuva 3.1). Tällöin ratkaisuun voi käyttää piiriyhtälöiden ratkaisuun soveltuvia menetelmiä. Näistä solmupistemetelmä on kätevin käytettäessä tietokonetta ratkaisemisessa. Nollatasoksi valitaan yleensä ympäristön lämpötila, jolloin solmupisteiden potentiaalit vastaavat niiden lämpenemiä ympäristöön nähden. Resistanssien käänteisarvoilla eli konduktansseilla muodostetaan yleisesti solmupistematriisi (Kylander 1995).

$$[G] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{1,i}} & \frac{-1}{R_{1,2}} & \frac{-1}{R_{1,3}} & \dots & \frac{-1}{R_{1,n}} \\ \frac{-1}{R_{2,1}} & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{2,i}} & \frac{-1}{R_{2,3}} & \dots & \frac{-1}{R_{2,n}} \\ \frac{-1}{R_{3,1}} & \frac{-1}{R_{3,2}} & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{3,i}} & \dots & \frac{-1}{R_{3,n}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{-1}{R_{n,1}} & \frac{-1}{R_{n,2}} & \frac{-1}{R_{n,3}} & \dots & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{n,i}} \end{bmatrix} \quad 3.18$$



Kuva 3.1 Lämpöverkon esimerkki

Häviötehot eli virtalähteet muodostavat yksisarakkeisen matriisin $[P]$

$$[P] = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \dots \\ P_n \end{bmatrix} \quad 3.19$$

ja potentiaali- eli lämpenemämatriisi $[\theta]$ on

$$[\theta] = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \dots \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad 3.20$$

Näiden matriisien tulona saadaan

$$[P] = [G][\theta] \quad 3.21$$

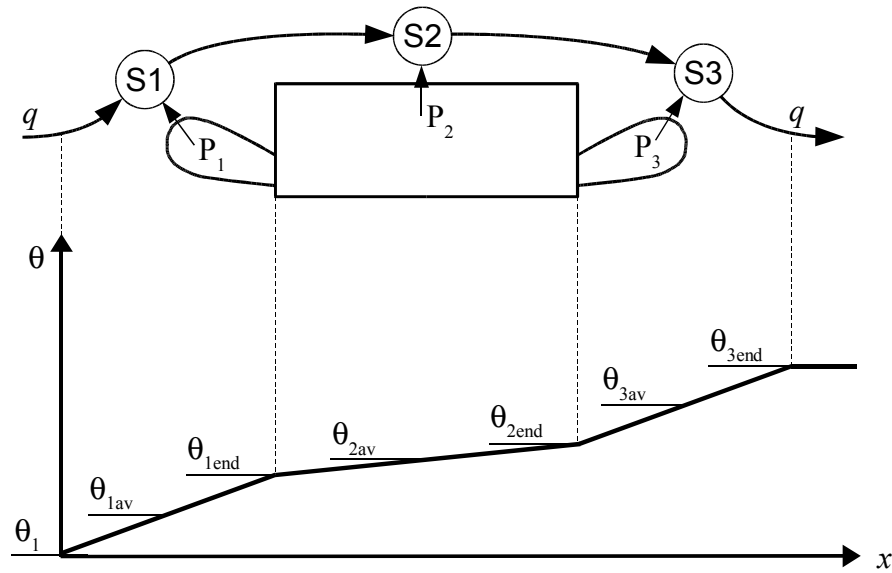
josta voidaan ratkaista helposti tietokoneohjelmistoja kuten Matlabia® tai APLAC®:ia käyttäen lämpenemämatriisi

$$[\theta] = [G]^{-1}[P] \quad 3.22$$

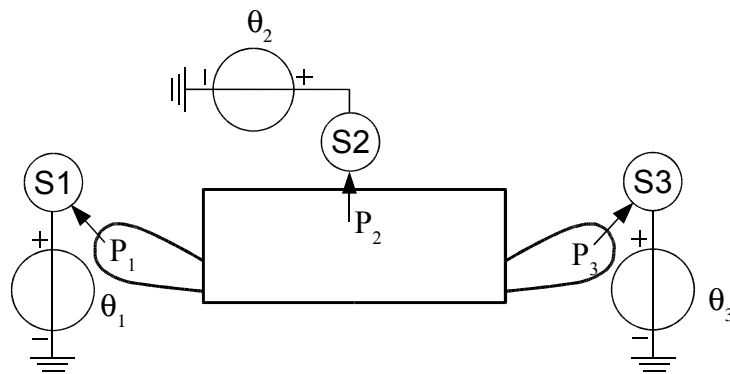
3.4 Ohjatut jännitelähteet

3.4.1 Ilmanvirtauksen vaikutus

Ilmavirtaus siirtää mukanaan lämpöä. Moottorin ilmatilassa on muutamia solmupisteitä, joissa ilmavirta lämpenee ja siirtää häviöitä koneen osasta toiseen. Tämän ilmavirran vaikutusta voidaan kuvata jännitelähteellä solmupisteiden välillä (Jokinen & Saari 1997). Tarkastellaan ilmavirtaa kuvassa 3.2 solmujen S1, S2 ja S3 välillä.



Kuva 3.2. Jäähdytysaineen lämpenemän kehitys kulkiessaan koneen läpi.



Kuva 3.3. Jäähdytysaineen vaikutus on korvattu ohjatuilla lämpölähteillä θ_1 , θ_2 ja θ_3 .

Ympäristönlämpöinen ilma virtaa pisteeseen S1 ja absorboi lämpöenergiaa solmuun tulevasta tehovirrasta P_1 :n verran. Ilma lämpenee ympäristön tasolta θ_1 tasolle θ_{1end} , jolloin sen lämpenemä vyyhdenpään alueella on laskettavissa yhtälöllä

$$\theta_{1end} = \frac{2 P_1}{2 \rho c_p q} = 2 R_q P_1 \quad 3.23$$

missä ρ on kaasun tiheys, c_p ominaislämpökapasiteetti ja q tilavuusvirta. Tällöin voidaan olettaa massavirtauksen olevan vakio, vaikka ilma lämpenisi ja laajenisi. Vastus R_q kuvaa virtaavan kaasun kykyä absorboida lämpöä, yksikkönä [K/W]. Keskimääräinen lämpenemä solmun S1 alueella on

$$\theta_{1av} = \frac{\theta_{1end} - \theta_1}{2} = R_q P_1 \quad 3.24$$

Samalla tavalla tapahtuu solmussa S2, jolloin ilma lämpenee vastaavasti pisteeseen tulevasta tehovirrasta P_2 keskimäärin

$$\theta_{2av} - \theta_{1end} = R_q P_2 \quad 3.25$$

Kun ilma lämpenee ensin tasolle θ_{1end} ja virtaa siitä pisteeseen S2, voidaan laskea molempien solmun lämpenemät kumulatiivisesti yhteen seuraavasti

$$\theta_{2end} = 2 R_q (P_1 + P_2) \quad 3.26$$

Solmun S2 alueella esim. ilmapälissä keskimääräinen lämpenemä ulkoilman tasolta θ_1 on vastaavasti

$$\theta_{2av} = 2 R_q P_1 + R_q P_2 \quad 3.27$$

Samoin tapahtuu solmussa S3, jolloin kokonaislämpenemä ulkoilman tasolta θ_1 solmun S3 keskimääräiselle tasolle θ_{3av} on

$$\theta_{3av} = 2 R_q P_1 + 2 R_q P_2 + R_q P_3 \quad 3.28$$

Edellisissä tapauksissa ohjattu lähde on kunkin solmupisteen ja maan välillä kuten kuvassa 3.3. Yhtä hyvin nämä lähteet voisivat olla kytkettynä solmujen S1 ja S2 väliin sekä solmujen S2 ja S3 väliin. Lämpenemien nousut θ_{2av} ja θ_{3av} voidaan kirjoittaa muotoon

$$\theta_{2av} = \theta_{1av} + \frac{\theta_{2end} - \theta_{1end}}{2} = \theta_{1av} + R_q P_1 + R_q P_2 = \theta_{1av} + \theta_{12} \quad 3.29$$

$$\theta_{3av} = \theta_{2av} + \frac{\theta_{3end} - \theta_{2end}}{2} = \theta_{2av} + R_q P_2 + R_q P_3 = \theta_{2av} + \theta_{23} \quad 3.30$$

joista voidaan johtaa jännitelähteet solmupisteiden välille

$$\begin{aligned} \theta_{12} &= R_q (P_1 + P_2) \\ \theta_{23} &= R_q (P_2 + P_3) \end{aligned} \quad 3.31$$

3.4.2 Ohjatut jännitelähteet solmupistematriisissa

Kun johtavuusmatriisissa (3.18) kirjataan kaikki ilmatilassa olevat solmut eli xF1, Vpi, Vpo ja AG1 matriisin oikeaan alakulmaan, voidaan niiden välille muodostaa riippuvuus ilmapvirtauksista (Jokinen 1972). Näihin solmuihin virtaavat tuntemattomat häviötehot $[P_u]$ sijoitetaan lähdematriisiin. Tällöin matriisiyhtälö (3.21) on tarkemmin esitettyä

$$[\mathbf{G}][\boldsymbol{\theta}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{P}] \\ [-\mathbf{P}_u] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{P}] \\ [0] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [0] \\ [\mathbf{P}_u] \end{bmatrix} \quad 3.32$$

missä $[\mathbf{P}]$ on tunnettujen häviöiden muodostama pystyvektori ja

$$[\mathbf{P}_u] = \begin{bmatrix} P_{AF1} \\ \dots \\ P_{Vpol} \\ \dots \\ P_{Vpil} \\ \dots \\ P_{AG1} \end{bmatrix} \quad 3.33$$

Matriisi muodostuu ilmatilan solmuihin tulevista tuntemattomista häviöistä. Koska myös lämpenemät em. solmuissa ovat tuntemattomia, ei yhtälöä voi ratkaista ilman ilmanvirtauksesta saatavia lisäyhtälöitä.

Luvussa 3.4 johdetut lähteiden yhtälöt voidaan kirjoittaa myös matriisimuodossa. Kun ympäristön ilma virtaa tuuletusaukosta sisään solmuun S1, lämpenee se siihen absorboituvasta lämmöstä keskimääräisesti yhtälöiden (3.24), (3.27) ja (3.28) mukaisesti ja ne voidaan kirjoittaa matriisimuotoon

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_q & 0 & 0 \\ 2R_q & R_q & 0 \\ 2R_q & 2R_q & R_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad 3.34$$

eli lyhyesti

$$[\boldsymbol{\theta}_u] = [\mathbf{R}_u][\mathbf{P}_u] \quad 3.35$$

Ratkaistaan edellinen yhtälö $[\mathbf{P}_u]$:n suhteen ja sijoitetaan se yhtälöön (3.32), jolloin lämpöverkon matriisiyhtälöksi saadaan

$$[\mathbf{G}][\boldsymbol{\theta}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{P}] \\ [0] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [0] \\ [\mathbf{R}_u]^{-1}[\boldsymbol{\theta}_u] \end{bmatrix} \quad 3.36$$

Tästä siirretään $\boldsymbol{\theta}_u$:n sisältävät termit vasemmalle puolelle jättämällä vain solmuihin tulevat tehot oikealle puolelle

$$\left[[\mathbf{G}] + \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & [\mathbf{R}_u]^{-1} \end{bmatrix} \right] [\boldsymbol{\theta}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{P}] \\ [0] \end{bmatrix} \quad 3.37$$

josta lämpenemämatriisi $[\theta]$ on ratkaistavissa

$$[\theta] = \left[[\mathbf{G}] + \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & [\mathbf{R}_u]^{-1} \end{bmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} [\mathbf{P}] \\ [0] \end{bmatrix} \quad 3.38$$

3.5 Muutostilojen laskenta

Työssä mallinnetaan lämpökäyttäytymistä erityisesti jaksollisessa käytössä. Moottorin osien massojen avulla lasketaan malliin laitettavat kapasitanssit kuten yhtälössä (3.7). Massat lasketaan vastuksien laskennassa käytettyjen mittojen ja tiheyden avulla. Kapasitanssit kytketään maan sekä joidenkin metallissa olevien solmupisteiden väliin eli ne tulevat solmupistematriisin diagonaalille. Lämpenemämatriisi $[\theta]$ ratkaistaan osittaisdifferentiaaliyhtälöstä

$$[\mathbf{C}]\left[\frac{d\theta}{dt}\right] + [\mathbf{G}][\theta] = [\mathbf{P}] \quad 3.39$$

Matlab[®]:ssa tai APLAC[®]:ssa ei tarvitse määritellä sen tarkemmin, miten kapasitanssit otetaan huomioon laskennassa. Matlab[®]:ssa tehdään numeerinen ratkaisu edelliselle yhtälölle. Yhtälöstä ratkaistaan ensin aikaderivaatta $d\theta/dt$, jota käytetään apuna ratkaistaessa *ode*-funktioilla lopullinen yhtälö. Em. funktio (*ordinary differential equation*) on osittaisdifferentiaaliyhtälöiden numeerinen ratkaisija, joka perustuu Runge-Kutta menetelmään. On kuitenkin otettava huomioon, että kapasitanssi esiintyy vain noin puolessa solmupisteistä eli toinen puoli on tavallisia algebrallisia yhtälöitä. Tämän ratkaisemiseksi on tehty jako osamatriiseihin, joissa ensimmäistä osaa integroidaan em. *ode*-funktioilla ja jälkimmäinen ratkaistaan edellisen perusteella. Osamatriisiyhtälö on

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{C}_1] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\dot{\theta}_1] \\ [\dot{\theta}_2] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{G}_{11}] & [\mathbf{G}_{12}] \\ [\mathbf{G}_{21}] & [\mathbf{G}_{22}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\theta_1] \\ [\theta_2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{P}_1] \\ [\mathbf{P}_2] \end{bmatrix} \quad 3.40$$

jossa Matlab[®]:n funktioilla on etsitty ensimmäiselle riville kapasitansseihin liittyvät differentiaaliyhtälöt ja alemmalle riville tavalliset yhtälöt. Tällöin rivit ovat auki-kirjoitettuina

$$\begin{aligned} [\mathbf{C}_1][\dot{\theta}_1] &= [\mathbf{G}_{11}][\theta_1] + [\mathbf{G}_{12}][\theta_2] + [\mathbf{P}_1] \\ 0 &= [\mathbf{G}_{21}][\theta_1] + [\mathbf{G}_{22}][\theta_2] + [\mathbf{P}_2] \end{aligned} \quad 3.41$$

Alemmasta yhtälöstä voidaan ratkaista θ_2

$$[\theta_2] = (-[G_{22}]^{-1} [G_{21}]) [\theta_1] - [G_{22}]^{-1} [P_2] \quad 3.42$$

ja sijoittaa se ylempään yhtälöön, niin saadaan osittaisdifferentiaaliyhtälö

$$[C_1][\dot{\theta}_1] = ([G_{11}] - [G_{12}][G_{22}]^{-1}[G_{21}])[\theta_1] + [P_1] - [G_{12}][G_{22}]^{-1}[P_2] \quad 3.43$$

Tätä voidaan kuvata lyhyesti

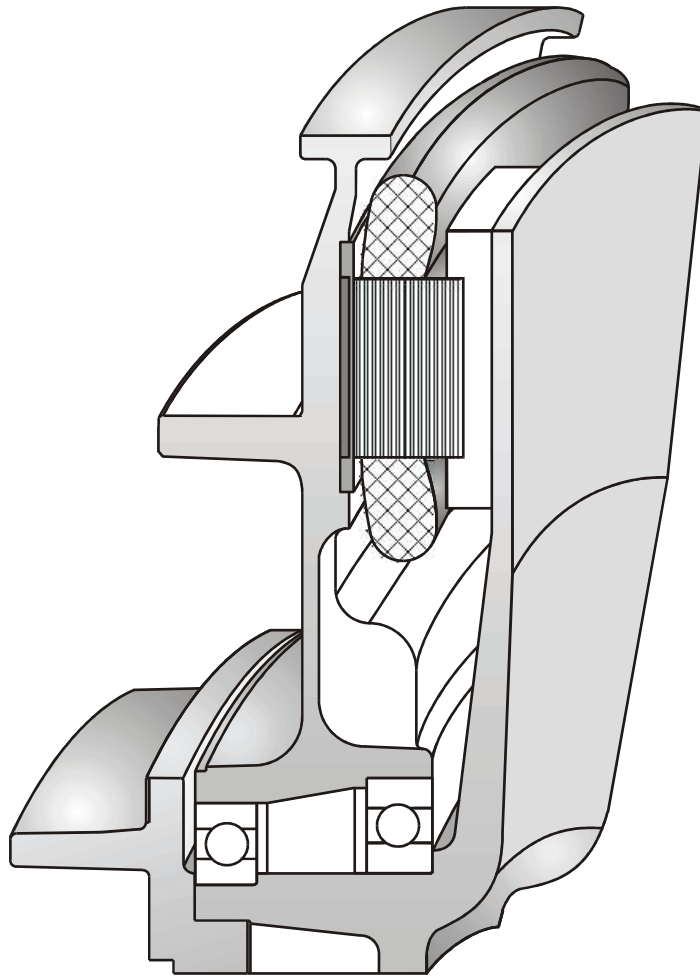
$$[\dot{\theta}_1] = \mathbf{A}[\theta_1] + \mathbf{B} \quad 3.44$$

Matlab[®]:ssa funktiot *ode23* ja *ode45* integroivat em. yhtälön avulla osamatriisille θ_1 arvot joka aika-askeleelle. Tämän jälkeen voidaan taas yhtälöllä (3.42) palauttaa $\theta_2:n$ arvot vastaaville aika-askeleille.

4. Lämpömalli

Moottorin lämpömallin suunnittelu lähti staattorin ja rungon jakamisesta kuuteen erilliseen laskentalohkoon eli sektoriin (kuva 4.1). Lämpömallin laskentakoodiin on jätetty mahdollisuus, jolla lohkojen määrän myöhempi muuttaminen on mahdollista. Määrää kuvaa muuttuja N , jonka arvo on toistaiseksi kuusi (6). Kussakin viipaleessa on samanlainen malli, mutta lohkoille voidaan haluttaessa antaa erisuuruisia ilmapvirtauksia ja lämmönsiirtymiskertoimia. Tällöin mallilla voidaan tarkastella myös epäsymmetrisen tuuletuksen vaikutusta lämpöjakaumaan. Ilmanvirtauksen muuttaminen mallissa vaatii ohjatun jännitelähteen kytkemistä joidenkin ilmatilan solmupisteiden väliin. Häviöt on laskettu magneettipiirien laskentaohjelmilla ja oletetaan tunnetuiksi. Staattorin häviötehot jaetaan N :llä tasan kuhunkin laskentalohkoon. Myös staattorin sekä rungon pinta-alat ja tilavuudet jaetaan lohkoihin. Tarvittaessa voidaan lisätä muita häviölähteitä, kuten jarrun aiheuttama häviölähde.

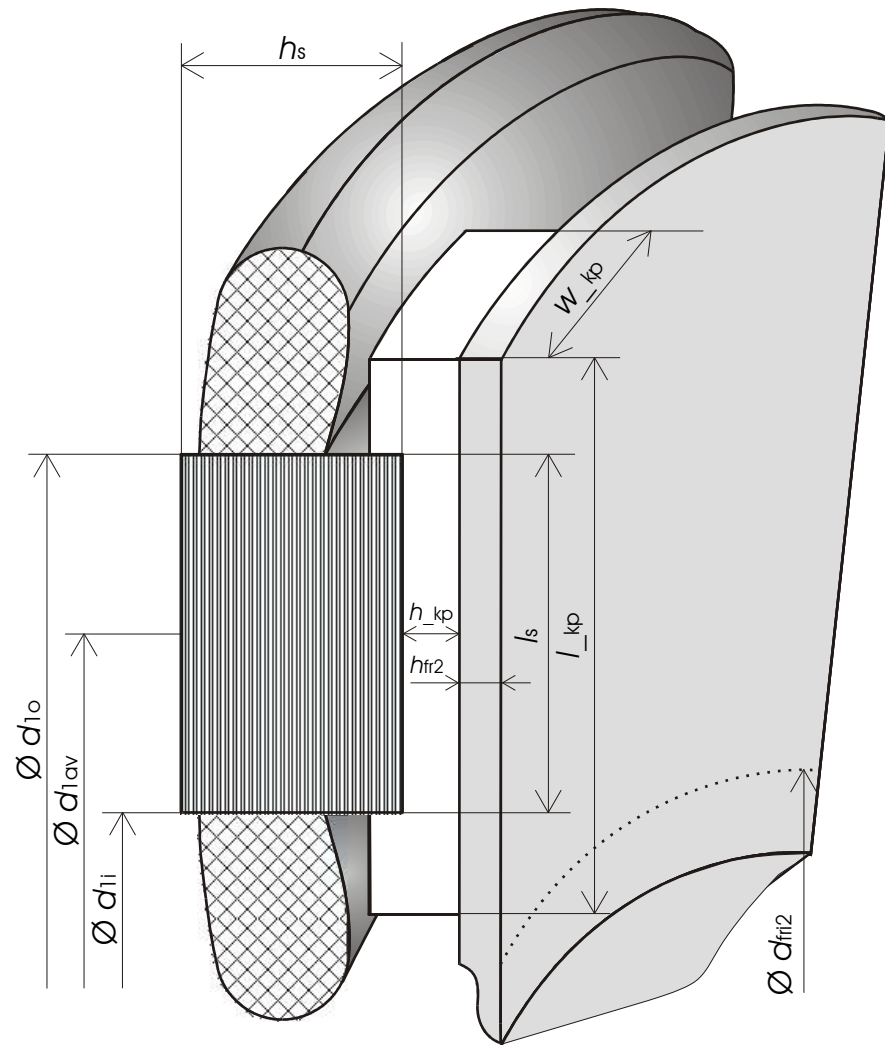
Solmupisteiden numeroinnissa on eritelty laskentalohko kirjainkoodilla A...F, jota seuraa järjestysnumero esim. solmu A2 on staattorin selässä lohossa A. Vyyhdensäiden ilmatilassa olevat solmupisteet on nimetty tunnuksilla Vpi tai Vpo, jossa 'i' merkitsee sisäkehän ilmatilaa ja 'o' ulkokehän ilmatilaa. Tunnuksen lopussa on järjestysnumero. Kussakin lohossa on kaksi Vpi ja kaksi Vpo solmua. Kaikki ilmatilassa olevat solmut on verkon kuvissa ympyröity kaksoisympyrällä. Moottorin rungossa olevat lämpömallin solmupisteet on nimetty lohosta riippuen tunnuksilla AF...FF, jonka jälkeen tulee järjestysnumero. Ilmavälissä on vain yksi solmupiste AG1, sillä roottorin pyöriessä ilmavälin ilma sekoittuu ja tasoittaa lämpötilat. Roottoria tarkastellaan perinteisesti yhtenä pyörähdyssymmetrisenä kappaleena. Roottorissa olevat solmut on nimetty tunnuksilla RT1...RT10, joista RT10 on paikallaan pysyvä laakerin keskiö.



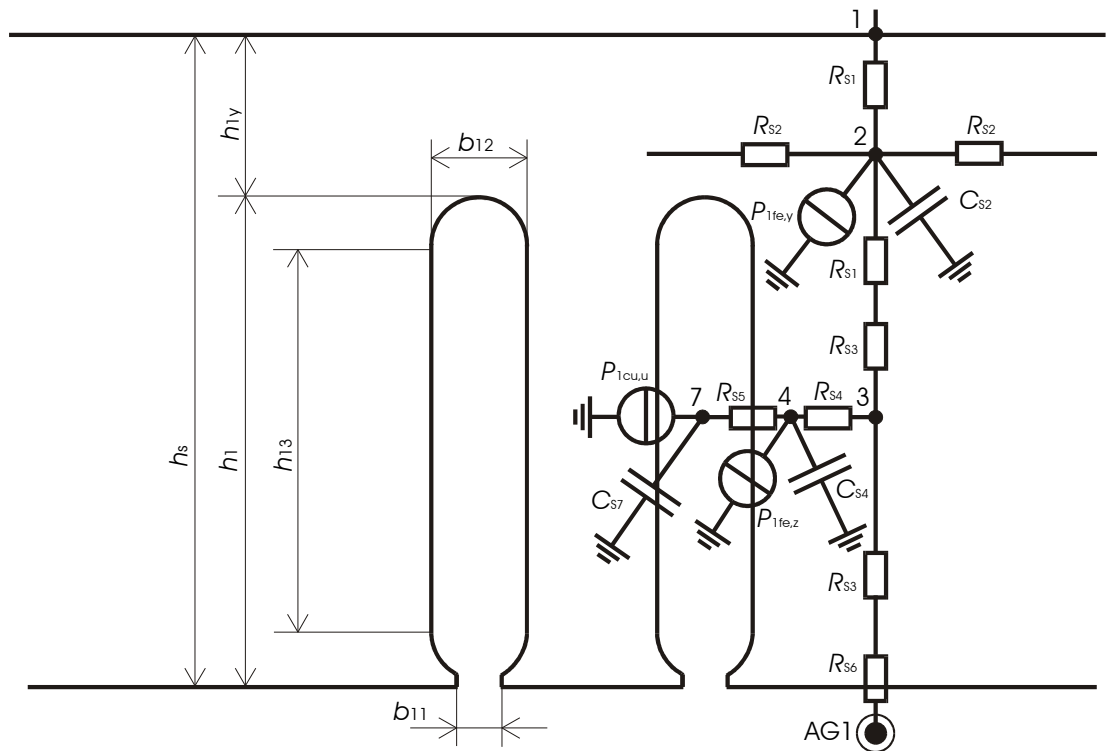
Kuva 4.1. Staattorin ja roottorin viipalekuva. Rungon ulkoreuna on leikattu pois.

4.1 Staattorin malli

Kaikille koneen osille lasketaan lämpövastukset perusyhtälön (3.1) mukaan. Tarvitavat dimensiot on esitetty kuvissa 4.2 ja 4.3. Ensin laaditaan lämpöverkko staattorisydämen osalta, joka on esitetty kuvassa 4.3. Lämpövastuksia laskettaessa ei tarvitse huomioida sähkölevyn eristeen lämmönjohtavuutta, sillä lämpövastukset lasketaan ainoastaan levyn suuntaisesti. Ympyrän kehän suuntaisten vastuksien yhtälöissä on pituus aproksimoitu kehän kaaren pituuden avulla. Staattorisydän on kiinnitetty kiinnityspaloin runkoon niin, että selän ja rungon väliin jää pieni ilmapäli (kuva 4.2).



Kuva 4.2. Staattorin ja kiinnityspalan dimensiot.



Kuva 4.3. Staattorilevysydän leikattuna urien poikki ja sen lämpöverkko.

Staattorin levysydän

Lämpövastuksien laskenta aloitetaan määrittämällä tarvittavat poikkipinnat. Staattorin pinta-ala aksiaalisuunnassa on

$$A_{1Fe} = \frac{\pi}{4N} (d_{1o}^2 - d_{1i}^2) \quad 4.1$$

missä d_{1o} ja d_{1i} ovat staattorin ulko- ja sisähalkaisija sekä N on laskentalohkojen lukumäärä, joka on toistaiseksi kuusi (6). Tätä samaa pinta-alaa tullaan käyttämään myöhemmin monessa kohdin. Hampaan raudan poikkipinta-ala saadaan vähentämällä edellisestä urien ala

$$A_{1z} = f_{fe} \left(A_{1Fe} - \frac{Q_1 b_{12} l_s}{N} \right) \quad 4.2$$

missä f_{fe} on levysydämen täytekerroin, Q_1 uraluku, b_{12} uran leveys ja l_s uran pituus. Hampaiden päiden pinta-ala on

$$A_{1zd} = f_{fe} \left(A_{1Fe} - \frac{Q_1 b_{11} l_s}{N} \right) \quad 4.3$$

missä b_{11} on uran suuaukon leveys. Pinta-alan A_{1Fe} avulla voidaan laskea selän pinnan solmun A1 solmuun A2 yhdistävän aksiaalisuuntaisen vastuksen R_{S1} arvo

$$R_{S1} = \frac{h_{1y}}{2 \lambda_p A_{1Fe} f_{fe}} \quad 4.4$$

jossa h_{1y} on selän vahvuus. Selässä olevia lohkojen välisiä solmuja A2, B2, C2, ... yhdistää kehän suuntaisesti vastus R_{S2} , joka on

$$R_{S2} \approx \frac{\pi d_{1av}}{2 \lambda_p l_s h_{1y} N} \quad 4.5$$

Selästä hampaaseen eli roottoria kohti vaikuttaa vastus

$$R_{S3} = \frac{h_1}{2 \lambda_p A_{1z}} \quad 4.6$$

Hampaasta uraan päin eli kuvitteelliseen keskiarvosolmuun 4, vaikuttaa vastus

$$R_{S4} = \frac{-R_3}{3} \quad 4.7$$

Hampaan pään pinta-alan avulla lasketaan hampaasta ilmavälin solmuun AG1 vaikuttava vastus

$$R_{S6} = \frac{1}{\alpha_{S6} A_{1zd}} \quad 4.8$$

jossa ilmavälin ja raudan välinen lämmönsiirtymiskerroin α_{S6} lasketaan Kylanderin (1995) mukaan

$$\alpha_{S6} = \frac{Nu \lambda_{air}}{\delta} \quad 4.9$$

Yhtälössä Nu on Nusseltin luku, jolle käytetään lukuarvoa 3, koska Taylorin luku on alle 1800 (Kylander 1995) ja (Parviainen 2005). Tällöin ilmavälin radiaalinen virtaus on hyvin pieni. Yhtälössä λ_{air} on ilman lämmönjohtavuus ja δ on ilmavälin suuruus. Oletetaan, että staattorin ura-aukosta ei siirry lämpöä ilmaväliin, vaan lämpö siirtyy kokonaan hampaan kautta. Uraeristeen lämpövastuksen R_{S5} laskemiseksi pitää laskea ensin urien seinämien pinta-ala

$$A_{1s} = \frac{Q_1 l_s (2h_{13} + \frac{\pi}{2} b_{12})}{N} \quad 4.10$$

jossa h_{13} on uran suoran osan korkeus. Em. keskiarvosolmun 4 ja uran kuparissa olevan keskiarvosolmun 7 välinen vastus uran seinämän läpi on

$$R_{S5} = \frac{1}{k_{1uer} A_{1s}} \quad 4.11$$

jossa kerroin k_{1uer} voidaan laskea Jokisen (1972) ja Gotterin (1954) mukaan summana vyyhden-, uraeristeen- ja metallikosketuksen lämmönsiirtymiskertoimista

$$k_{1uer} = \left(\frac{b_{13}}{6 \lambda_{res}} + \frac{\varepsilon_{uer}}{\lambda_{uer}} + \frac{1}{\alpha_{uer}} \right)^{-1} \quad 4.12$$

missä b_{13} on uran leveys vähennettynä uraeristeellä, ε_{uer} uraeristeen vahvuus ja α_{uer} uraeristeen ja raudan välinen kosketusresistanssi. Ensimmäinen termi jaetaan kuudella, koska uran keskimääräinen lämpenemä on $2/3 \theta_{max}$ ja sen pisteen etäisyys uran reunasta on $1/4 b_{13}$. Yhtälössä uran poikittainen lämmönjohtavuus λ_{res} hampaaseen päin lasketaan em. lähteiden mukaan ns. resuloivana resistanssina pyörölankakäämin poikkisuunnassa. Koska kuparin lämmönjohtavuus on moninkertaisesti suurempi

kuin eristeiden, voidaan se jättää huomiotta. Tällöin resuloiva lämmönjohtavuus on

$$\lambda_{\text{res}} = \lambda_{\text{ins}} \left(\frac{d}{\delta_i} + \frac{\delta_i}{d'} \right) \quad 4.13$$

jossa λ_{ins} on emalieristeen johtavuus, d on langan kupariosan halkaisija, d' langan kokonaishalkaisija ja δ_i emalieristekerrosten vahvuus.

Uran pituussuunta

Uran kuparisissa käämilangoissa muodostuva häviö jakaantuu tasaisesti koko uran mitalle. Tällöin tilannetta voi kuvata tikapuumallilla kuten sähkölinjaa, jossa vaikuttaa konduktanssi maata vastaan jokaista metriä kohden. Eli resistanssi tai konduktanssi voidaan laskea pituusyksikköä kohden. Nämä rinnan- ja sarjaankytketyt pienet vastukset voidaan mallissa yhdistää yhdeksi T-malliseksi sijaiskytkennäksi, jonka haaroissa on alku- ja loppupään lämpenemät ja keskellä keskimääräinen lämpenemä (Jokinen 1972). Vyyhden verkko on kuvattu kuvassa 4.4.

Vastus uran suunnassa on

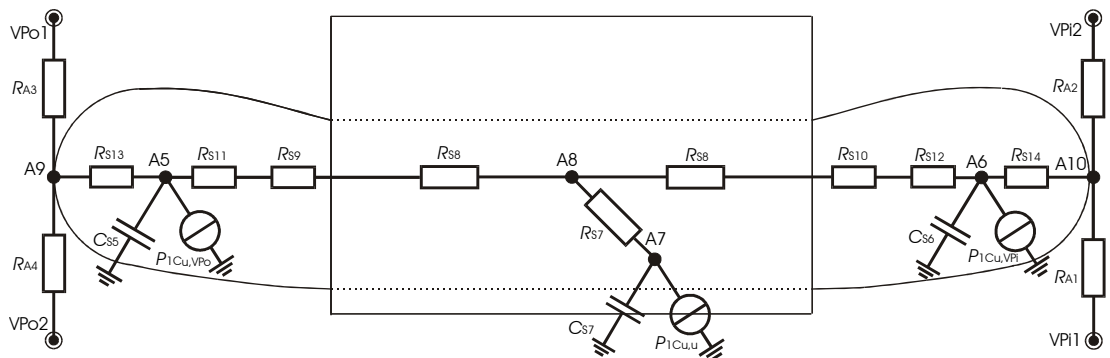
$$R_{K1} = \frac{N l_s}{\lambda_{\text{Cu}} Q_1 A_{1\text{Cu}}} \quad 4.14$$

Uran seinämän ja hampaan välillä vaikuttaa uran alueella konduktanssi

$$G_{K1} = \frac{1}{R_{S5}} \quad 4.15$$

Keskiarvosolmun A8 ja urassa olevan todellisen solmun A7 välissä on vastus

$$\begin{aligned} R_{S7} &= \frac{1}{G_{K1}} \left(\frac{\sqrt{(R_{K1} G_{K1})}}{\sinh(\sqrt{(R_{K1} G_{K1})})} - 1 \right) \\ &= \frac{1}{G_{K1}} \left(\frac{2\sqrt{(R_{K1} G_{K1})}}{e^{\sqrt{(R_{K1} G_{K1})}} - e^{-\sqrt{(R_{K1} G_{K1})}}} - 1 \right) \end{aligned} \quad 4.16$$



Kuva 4.4. Vyyhden ja vyyhdenpäiden lämpöverkko.

Solmusta A8 jakaantuu vyyhdenpäiden suuntaan vastus

$$R_{S8} = \frac{R_{K1}}{2} \frac{\tanh\left(\frac{1}{2} \sqrt{(R_{K1} G_{K1})}\right)}{\frac{1}{2} \sqrt{(R_{K1} G_{K1})}} = \frac{R_{K1}}{2} \frac{e^{\frac{1}{2} \sqrt{(R_{K1} G_{K1})}} - e^{-\frac{1}{2} \sqrt{(R_{K1} G_{K1})}}}{e^{\frac{1}{2} \sqrt{(R_{K1} G_{K1})}} + e^{-\frac{1}{2} \sqrt{(R_{K1} G_{K1})}}}$$
4.17

merkitsemällä nimittäjä lyhyesti

$$x = \frac{1}{2} \sqrt{(R_{K1} G_{K1})}$$
4.18

saadaan sievennetty yhtälö

$$R_{S8} = \frac{R_{K1}}{2x} \cdot \frac{e^x - e^{-x}}{e^x - e^{-x}} = \frac{R_{K1}}{2x} \cdot \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}$$
4.19

Laskentaohjelmassa eksponenttilauseke e^{2x} on ohjelmarivin yksinkertaistamiseksi korvattu muuttujalla exg

$$exg = e^{2x} = e^{\sqrt{(R_{K1} G_{K1})}}$$
4.20

Ulkokehän vyyhdenpää

Samaa laskentamenetelmää käytetään sisä- ja ulkovyyhdenpäässä. Ensin pitää laskea ulomman vyyhdenpään jäähdyttävä ala.

$$A_{lvpo} = k_{lvpo} \pi \left(d_{lo} - \frac{l_{lvpo}}{2} \right) l_{lvpo} \frac{1}{N}$$
4.21

jossa k_{lvpo} on vyyhdenpään pinta-alan korjauskerroin ja l_{lvpo} vyyhdenpään pituus. Vastus ulomman vyyhdenpään kuparin suunnassa on

$$R_{Ko} = \frac{N l_{lvpo}}{2 \lambda_{Cu} Q_1 A_{lCu}}$$
4.22

Lämmönjohtavuus vyyhdenpäässä lasketaan samoin kuin urasta hampaaseen

$$k_{lvpoer} = \left(\frac{b_{vpo}}{6 \lambda_{res}} \right)^{-1}$$
4.23

jossa resultoiva lämmönjohtavuus lasketaan yhtälöllä (4.13). Ulomman vyyhdenpään sisältä vyyhden pintaan vaikuttava lämpövastus on

$$R_{S13} = \frac{1}{k_{lvpoer} A_{lvpo}} \quad 4.24$$

Vyyhdenpään matkalla vaikuttaa konduktanssi ympäristöön samoin kuin urassa

$$G_{Ko} = \frac{1}{R_{S13}} \quad 4.25$$

Näistä lasketaan yhteinen muuttuja, kuten edellä

$$x_o = \frac{1}{2} \sqrt{(R_{Ko} G_{Ko})} \quad 4.26$$

$$exg = e^{2x_o} = e^{\sqrt{(R_{Ko} G_{Ko})}} \quad 4.27$$

Vastukset

$$R_{S9} = \frac{R_{Ko}}{2x_o} \cdot \frac{exg - 1}{exg + 1} \quad 4.28$$

$$R_{S11} = R_{S13} \left(\frac{4x_o}{exg - 1/exg} - 1 \right) \quad 4.29$$

yhdistävät uran ulompaan vyyhdenpäähän

Sisäkehän vyyhdenpää

Sisäkehän tilanne on identtinen ulkokehän kanssa. Jäähdyttävä ala on

$$A_{lvpi} = k_{lvpi} \pi \left(d_{li} - \frac{l_{lvpi}}{2} \right) l_{lvpi} \frac{1}{N} \quad 4.30$$

Vastus sisemmän vyyhdenpään kuparin suunnassa on

$$R_{Ki} = \frac{N l_{lvpi}}{2 \lambda_{Cu} Q_1 A_{lCu}} \quad 4.31$$

Vyyhden sisältä ulkopintaan vaikuttaa vastus

$$R_{S14} = \frac{1}{k_{lvpier} A_{lvpi}} \quad 4.32$$

Vastukset

$$R_{S10} = \frac{R_{Ki}}{2 x_i} \cdot \frac{exg - 1}{exg + 1} \quad 4.33$$

$$R_{S12} = R_{S14} \left(\frac{4 x_i}{exg - 1/exg} - 1 \right) \quad 4.34$$

yhdistävät uran sisempään vyyhdenpäähän

Vyyhdenpään pinnasta lämpö siirtyy konvektion avulla vyyhdenpään ilmatilaan molemmin puolin vyyhteä sekä sisä-, että ulkokehällä kuten kuvassa 4.4. Nämä resistanssit lasketaan erikseen kussakin lohossa, R_{B1} , R_{C1} , Lisätuuletuksella saattaa eri lohkoissa olla eri suuruinen ilman virtaus, jolloin α_{B1} , α_{C1} , ... ovat myös eri suuruisia. Lohkossa A vyyhdenpään pinnasta sisempään ilmatilaan roottorin puolelle vaikuttaa vastus

$$R_{A1} = \frac{2}{\alpha_{A1} A_{1vpi}} \quad 4.35$$

Vyyhdenpään pinnasta sisempään ilmatilaan staattorin puolelle on vastus

$$R_{A2} = \frac{2}{\alpha_{A2} A_{1vpi}} \quad 4.36$$

Vyyhdenpään pinnasta ulompaan ilmatilaan staattorin puolelle on vastus

$$R_{A3} = \frac{2}{\alpha_{A3} A_{1vpo}} \quad 4.37$$

Vyyhdenpään pinnasta ulompaan ilmatilaan roottorin puolelle on vastus

$$R_{A4} = \frac{2}{\alpha_{A4} A_{1vpo}} \quad 4.38$$

Staattori on kiinnitetty valurautaiseen runkoon kiinnityspaloin, jotka hitsataan staattoriselkään. Yhdessä lohossa olevien palojen pinta-ala staattoriselän puolella on

$$A_{1KPD} = \frac{N_{KP} l_{KPD} w_{KP}}{N} \quad 4.39$$

jossa N_{KP} on palojen lukumäärä ja runkoon ruuvein kiinnitetty kosketusala A_{1KPN} lohkoa kohden on vähän isompi

$$A_{1KPN} = \frac{N_{KP} l_{KPN} w_{KP}}{N} \quad 4.40$$

Lämpöresistanssi staattorin selän pinnan solmusta A1 kiinnityspalaan on

$$R_{SF1} = \frac{1}{\alpha_{SF1} A_{1KPD}} + \frac{h_{KP}}{2 \lambda_{Fe} A_{1KPD}} \quad 4.41$$

jossa h_{KP} on palan korkeus. Resistanssi kiinnityspalasta rungon solmuun AF2 on vastaavasti

$$R_{SF2} = \frac{h_{KP}}{2 \lambda_{Fe} A_{1KPN}} + \frac{1}{\alpha_{SF2} A_{1KPN}} + \frac{h_{Fr2}}{2 \lambda_{Fr} A_{1KPN}} \quad 4.42$$

Siirtymisresistanssi R_{A5} staattorin solmusta A1 sen ja rungon välisessä ilmatilassa olevaan solmuun AF1 saadaan yhtälöstä

$$R_{A5} = \frac{1}{\alpha_{A5} A_{1FeFr}} \quad 4.43$$

Tämä resistanssi lasketaan myös erikseen lohkoittain, R_{B5} , R_{C5} , ... Lisätuuletuksella saattaa eri lohkoissa ilman virtaus olla eri suuruinen, jolloin α_{B5} , α_{C5} , ... ovat myös eri suuruksia. Em. yhtälössä ilmatilan pinta-ala A_{1FeFr} saadaan erotuksena staattorin pinta-alasta

$$A_{1FeFr} = A_{1Fe} - A_{1KPD} \quad 4.45$$

Staattorin lämpökapasitanssit

Kuvassa 4.3 on muutamaan solmuun liitetty kondensaattori, jotka kuvaavat lämpökapasiteettia. Edellä esitettyjä pinta-aloja hyväksikäyttäen lasketaan osien tilavuudet, joista saadaan kapasitanssit kertomalla ne tiheydellä ja ominaislämpökapasiteetilla. Kiinnityspalan muodostama lämpökapasitanssi vaikuttaa staattorin solmuissa A1, B1, ... seuraavasti

$$C_{SF1} = \rho_{Fe} c_{Fe} (A_{1KPN} h_{KP}) \quad 4.46$$

Staattoriselän kapasitanssi solmuissa A2, B2, ... lasketaan staattorin raudan tilavuuden avulla on

$$C_{S2} = \rho_p c_p (A_{1Fe} f_{fe} h_{ly}) \quad 4.47$$

Koska uraeriste on rautaan verrattuna kevyttä materiaalia, jätetään sen kapasitanssi huomioimatta. Kun staattorin ilmavälin puoleisesta tilavuudesta vähennetään urien leikkaama osa, saadaan hampaiden raudan tilavuus ja solmussa A4 kapasitanssiksi

$$C_{S4} = \rho_p c_p f_{fe} \left[A_{1Fe} h_1 - \frac{Q_1 l_s}{N} \left(\frac{\pi}{4} b_{12}^2 + b_{12} h_{13} \right) \right] \quad 4.48$$

Uran solmussa A7 olevan kuparin kapasitanssi on lyhyesti

$$C_{S7} = \rho_{cu} c_{cu} \frac{A_{1cu} l_s Q_1}{N} \quad 4.49$$

Kuparin kapasitanssi ulomman vyyhdenpään solmussa A5 on

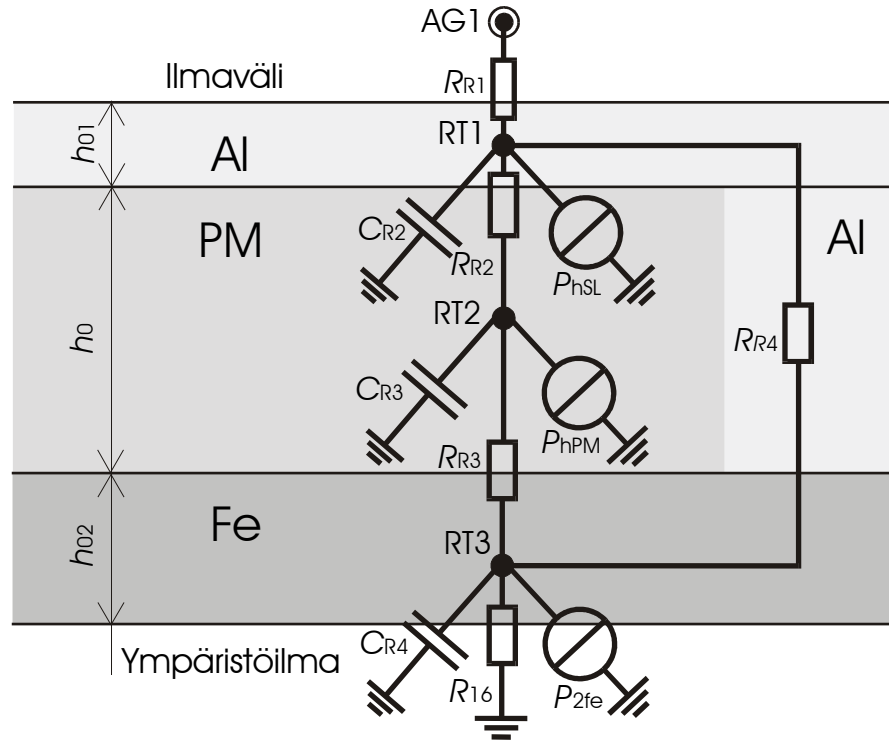
$$C_{S5} = \rho_{cu} c_{cu} \frac{A_{1cu} l_{ivpo} Q_1}{N} \quad 4.50$$

Kuparin kapasitanssi sisemmän vyyhdenpään solmussa A6 on

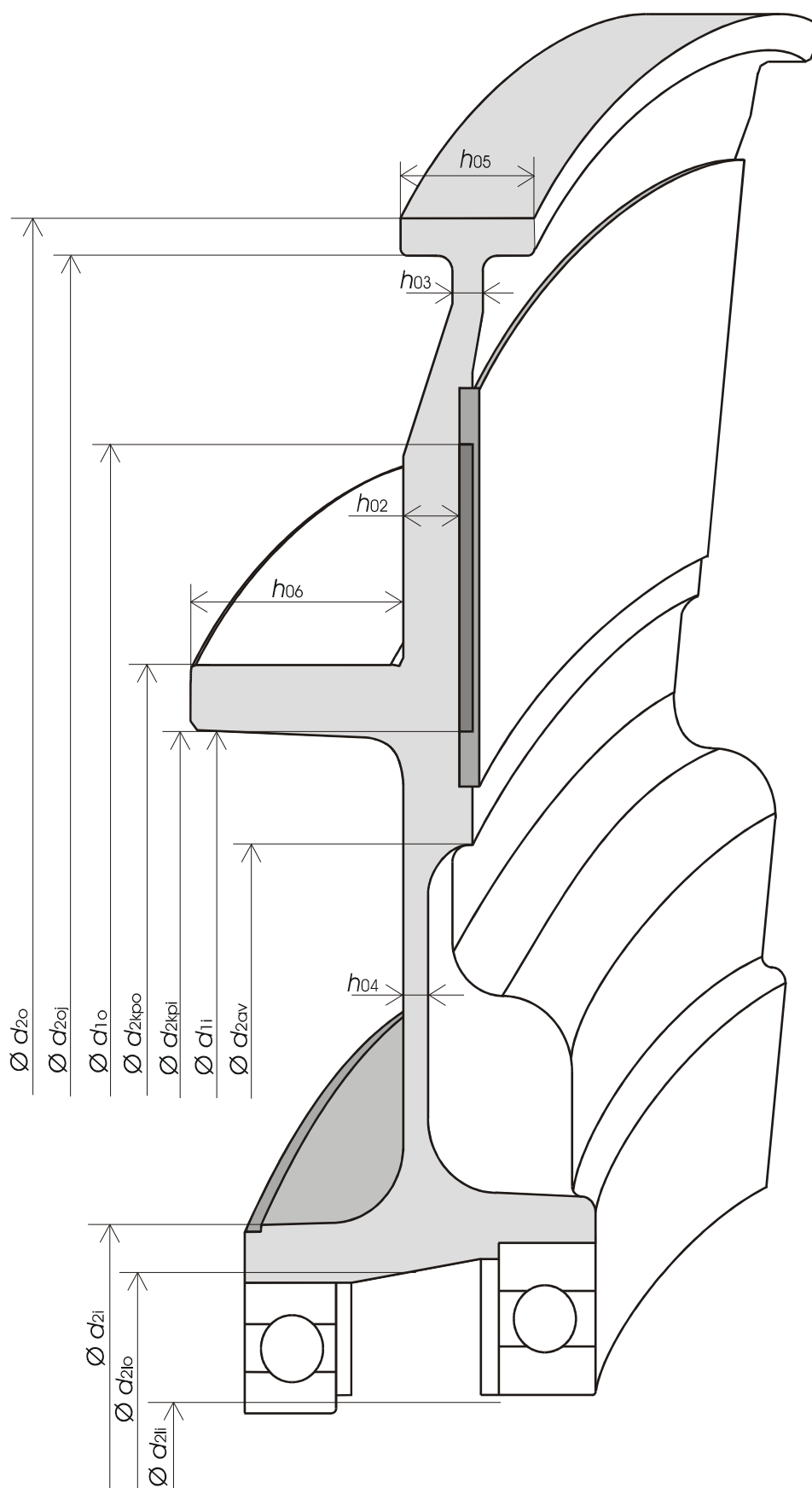
$$C_{S6} = \rho_{cu} c_{cu} \frac{A_{1cu} l_{ivpi} Q_1}{N} \quad 4.51$$

4.2 Roottorin malli

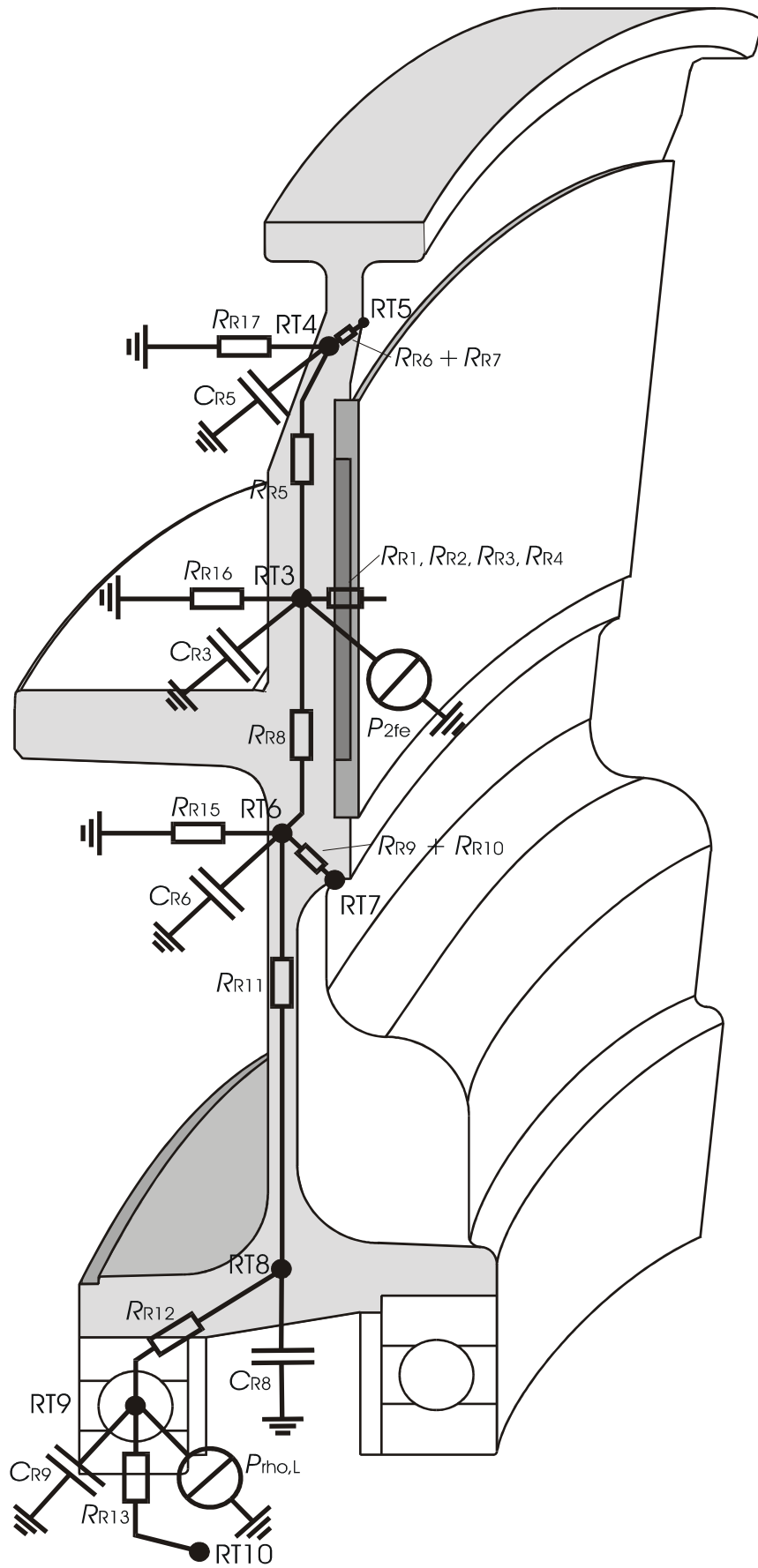
Roottori lasketaan yhtenä pyörähdyssymmetrisenä kappaleena eikä sitä jaeta lohkoihin kuten staattori, sillä pyörimisliike tasoittaa lämpötilat. Magneettien kohdalla oleva lämpöverkko on esitetty kuvassa 4.5. Roottorin dimensiot on kuvattu kuvassa 4.6 ja lämpöverkko kuvassa 4.7.



Kuva 4.5. Roottorin lämpöverkko magneettien kohdalla.



Kuva 4.6. Roottorin dimensiot.



Kuva 4.7. Roottorin lämpöverkko.

Lähdetään tarkastelussa liikkeelle ilmvälin solmusta AG1 laskemalla ensin tarvittavat pinta-alat. Kestomagneettien pinnalla oleva alumiininen ohut suojalevy peittää koko staattoria vasten olevan alan, joten sen pinta-ala on yksinkertaisesti

$$A_{2SL} = A_{1Fe} N \quad 4.52$$

jossa N on laskentalohkojen lukumäärä. Kestomagneettien yhteispinta-ala saadaan kertomalla yhden magneetin ala A_{PM} niiden lukumäärällä N_{PM}

$$A_{2PM} = A_{PM} N_{PM} \quad 4.53$$

Magneettien välissä on alumiininen kehyslevy, johon on jyrsitty aukot magneettien kohdalle. Sen pinta-ala on edellisten avulla laskettuna

$$A_{2VL} = A_{2SL} - A_{2PM} \quad 4.54$$

Roottorin vastusverkko

Vastus R_{R1} ilmvälistä suojalevyyn on

$$R_{R1} = \frac{1}{\alpha_{R1} A_{2SL}} + \frac{h_{01}}{2 \lambda_{Al} A_{2SL}} \quad 4.55$$

missä h_{01} on suojalevyn vahvuus. Vastus suojalevystä magneettiin on

$$R_{R2} = \frac{h_{01}}{2 \lambda_{Al} A_{2PM}} + \frac{1}{\alpha_{R2} A_{2PM}} + \frac{h_0}{2 \lambda_{PM} A_{2PM}} \quad 4.56$$

missä h_0 on magneetin vahvuus. Vastus magneetista roottorin rungon teräslevyyn eli solmuun RT3 on

$$R_{R3} = \frac{h_0}{2 \lambda_{PM} A_{2PM}} + \frac{1}{\alpha_{R3} A_{2PM}} + \frac{h_{02}}{2 \lambda_{Fe} A_{2PM}} \quad 4.57$$

missä h_{02} on roottorin vahvuus. Magneetteja ympäröivän kehyslevyn läpi pääsee lämpöä myös rinnakkaista reittiä solmusta RT1 solmuun RT3

$$R_{R4} = \frac{h_{01}}{2 \lambda_{Al} A_{2VL}} + \frac{1}{\alpha_{Al} A_{2VL}} + \frac{h_0}{\lambda_{Al} A_{2VL}} + \frac{1}{\alpha_{R4} A_{2VL}} + \frac{h_{02}}{2 \lambda_{Fe} A_{2VL}} \quad 4.58$$

Roottorin ulko- ja sisäkehän laskutoimituksia varten lasketaan ko. alueiden pinta-alat käyttäen roottorin halkaisijoita, jotka on esitetty kuvassa 4.6. Ulkokehän vyyhden päätilaa vastaan on pinta-ala

$$A_{2vpo} = \frac{\pi}{4} (d_{2o}^2 - d_{1o}^2) \quad 4.59$$

ja sisäkehän vyyhdenpäättä vastaan on pinta-ala

$$A_{2vpi} = \frac{\pi}{4} (d_{1i}^2 - d_{2i}^2) \quad 4.60$$

Säteissuunnassa roottorin ulkokehää kohti eli solmusta RT3 solmuun RT4 johtaa vastus

$$R_{R5} = \frac{1}{2\pi h_{02} \lambda_{Fe}} \cdot \ln \frac{d_{1o} + d_{2o}}{d_{1o} + d_{1i}} \quad 4.61$$

Roottorin ulkokehältä ulompaan vyyhdenpäätilaan eli solmuun RT5 johtaa raudan ja pinnan vastukset

$$R_{R6} = \frac{h_{03}}{2 \lambda_{Fe} A_{2vpo}} \quad 4.62$$

$$R_{R7} = \frac{1}{\alpha_{R7} A_{2vpo}} \quad 4.63$$

Säteissuunnassa roottorin sisäkehää kohti eli solmusta RT3 solmuun RT6 johtaa vastus

$$R_{R8} = \frac{1}{2\pi h_{02} \lambda_{Fe}} \ln \frac{d_{1o} + d_{1i}}{d_{1i} + d_{2av}} \quad 4.64$$

Roottorin keskikehältä sisempään vyyhdenpäätilaan eli solmuun RT7 johtaa raudan ja pinnan vastukset

$$R_{R9} = \frac{h_{02}}{2 \lambda_{R9} A_{2vpi}} \quad 4.65$$

$$R_{R10} = \frac{1}{\alpha_{R10} A_{2vpi}} \quad 4.66$$

Roottorin laakerin ulkokehältä eli solmusta RT8 solmuun RT6 johtaa säteittäisesti vastus

$$R_{R11} = \frac{1}{2\pi h_{04} \lambda_{Fe}} \ln \frac{d_{1i} + d_{2av}}{2 d_{2i}} \quad 4.67$$

jossa h_{04} on roottorin vahvuus ohuemmasta kohdin ja d_{2av} on halkaisija kohdasta,

josta roottorirunko alkaa ohenemaan. Staattorin laakerikeskiön paikallaan olevasta solmusta RT10 ympäröivään ilmaan D-suuntaan eli roottorin puolelle johtaa vastus

$$R_{R14} = \frac{1}{\alpha_{R14} A_{Frkesd}} + \frac{h_{Fr4}}{2 \lambda_{Fr} A_{Frkesd}} \quad 4.68$$

jonka pinta-alassa A_{Frkesd} otetaan huomioon myös laakerin jäähdyttävä ala eli se lasketaan laakerin keskimääräisen ulkohalkaisijan mukaan seuraavasti

$$A_{Frkesd} = \frac{\pi}{4} (d_{2lo})^2 \quad 4.69$$

Roottorin selästä sisäreunan alalta lämpöä siirtää ulkoilmaan vastus

$$R_{R15} = \frac{1}{\alpha_{R15} A_{2vpi}} + \frac{h_{04}}{2 \lambda_{Fe} A_{2vpi}} \quad 4.70$$

Roottorin selän keskivaiheilta eli magneettien kohdalta johtaa ulkoilmaan vastus

$$R_{R16} = \frac{1}{\alpha_{R16} A_{2SL}} + \frac{h_{02}}{2 \lambda_{Fe} A_{2SL}} \quad 4.71$$

Roottorin selän ulkoreunalta johtaa ulkoilmaan vastus

$$R_{R17} = \frac{1}{\alpha_{R17} A_{2vpo}} + \frac{h_{03}}{2 \lambda_{Fe} A_{2vpo}} \quad 4.72$$

Laakerit

Laakereiden resistansseille R_{R12} ja R_{R13} annetaan arvot, jotka on saatu selville mittauksin. Tapauksessa kahta laakeria käsitellään yhtenä komponenttina, koska ne ovat rinnakkain ja lähellä toisiaan. Mitattu lämpötila oli liki sama ulko- ja sisäsovitteessa, joten vastuksen tarkkuudella ei ole mitatussa mallissa suurta merkitystä.

Roottorin lämpökapasitanssit

Roottorin kapasitanssit lasketaan samoin kuin staattorissa. Alumiinisen suojalevyn kapasitanssi voidaan laskea tiheyden, tilavuuden ja ominaislämpökapasiteetin avulla

$$C_{R1} = \rho_{Al} c_{Al} (A_{2SL} h_{01}) \quad 4.73$$

Kestomagneettien kapasitanssi lasketaan myös niiden yhteistilavuuden avulla

$$C_{R2} = \rho_{PM} c_{PM} (A_{2PM} h_0) \quad 4.74$$

Magneetteja ympäröivän kehyslevyn kapasitanssi lasketaan myös tilavuuden avulla

$$C_{R4} = \rho_{Al} c_{Al} (A_{2VL} h_0) \quad 4.75$$

Roottoriteräksen kapasitanssi lasketaan magneettien takana olevan tilavuuden mukaan

$$C_{R3} = \rho_{Fe} c_{Fe} (A_{1Fe} N h_{02}) \quad 4.76$$

Ulomman vyyhdenpään roottorin solmuun RT4 vaikuttavassa kapasitanssissa pitää huomioida myös ulkokehän eli jarrulevyn massa, jolloin se lasketaan seuraavasti

$$C_{R5} = \rho_{Fe} c_{Fe} \left[A_{2vpo} h_{03} + \frac{\pi h_{05}}{4} (d_{2o}^2 - d_{2oj}^2) \right] \quad 4.77$$

jossa h_{05} on jarrutuspinnan leveys ja d_{2oj} jarrutuspinnan sisähalkaisija. Sisemmän vyyhdenpään solmussa RT6 vaikuttava kapasitanssi lasketaan summana

$$C_{R6} = \rho_{Fe} c_{Fe} \left[A_{2vpi} h_{04} + \frac{\pi h_{06}}{4} (d_{kpo}^2 - d_{2kpi}^2) \right] \quad 4.78$$

jossa h_{04} on roottorin vahvuus ohuemmasta kohdasta ja h_{06} , d_{kpo} ja d_{kpi} ovat roottorin vahvikekiekon mitat. Laakerin ulkokehän kapasitanssi saadaan yhtälöstä

$$C_{R8} = \rho_{Fe} c_{Fe} \frac{\pi h_{Fr4}}{4} (d_{2i}^2 - d_{2lo}^2) \quad 4.79$$

jossa halkaisija d_{2lo} on laakerien keskimääräinen ulkohalkaisija. Laakerien kapasitanssi saadaan niiden luettelossa ilmoitettujen massojen avulla

$$C_{R9} = c_{Fe} (m_{la1} + m_{la2}) \quad 4.80$$

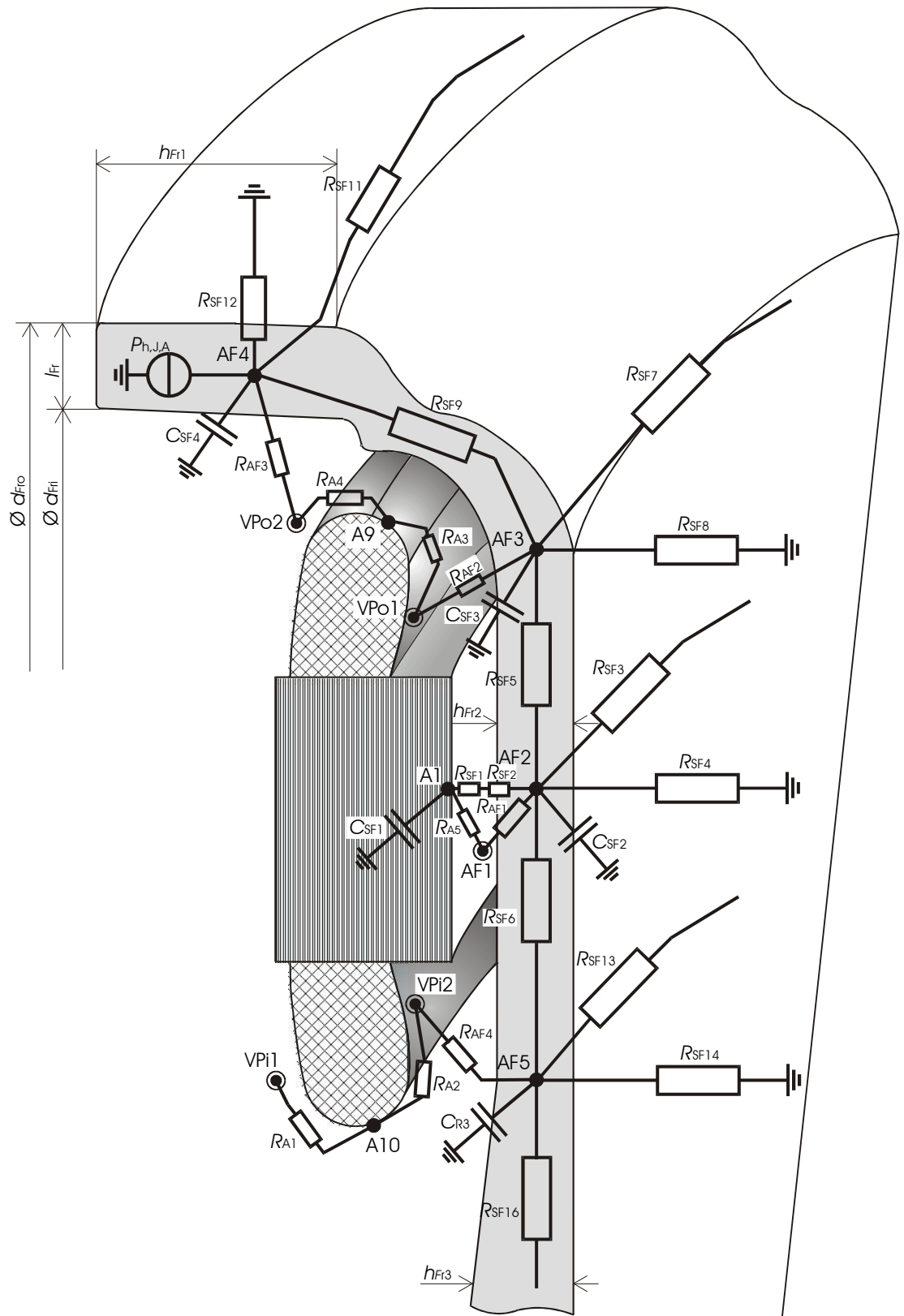
4.3 Rungon lämpöverkko

Rungon lämpöverkko koostuu myös kuudesta lohokosta, kuten staattorinkin, eli pinta-alat jaetaan N :llä. Rungon ulkokehän dimensioid ja verkko on esitetty kuvassa 4.7 ja keskiön kuvassa 4.8. Aloitetaan tarkastelu staattorin selän ilmatilan solmusta AF1.

Rungon vastusverkko

Siirtymisresistanssi ilmatilasta rungon suuntaan solmuun AF2 saadaan yhtälöstä

$$R_{AF1} = \frac{1}{\alpha_{AF1} A_{1FeFr}} + \frac{h_{Fr2}}{2 \lambda_{Fr} A_{1FeFr}} \quad 4.81$$



Kuva 4.8. Rungon ulkokehän dimensioid ja lämpöverkko.

Tämä resistanssi lasketaan erikseen lohkoittain R_{BF1} , R_{CF1} , Eri lohkoissa saattaa ilman virtaus olla eri suuruinen kuten vyyhdenpään tapauksessa, jolloin α_{BF1} , α_{CF1} , ... ovat eri suuruisia. Ympyrän kehän suuntaisten vastuksien yhtälöissä on pituus aproksimoitu kehän kaaren pituuden avulla, kuten staattorissa. Rungon lohkojen välisiä solmuja AF2, BF2, CF2, ... yhdistävät kehän suuntaisesti vastukset

$$R_{SF3} \approx \frac{\pi d_{lav}}{2 \lambda_{Fr} l_s h_{Fr2} N} \quad 4.82$$

jossa em. solmujen keskimääräinen halkaisija d_{lav} saadaan staattorin mitoista

$$d_{lav} = \frac{d_{lo} + d_{li}}{2} \quad 4.83$$

Rungon em. kohdalta ympäristöön siirtyy lämpöä siirtymisvastuksen yli

$$R_{SF4} = \frac{h_{Fr2}}{2 \lambda_{Fr} A_{1Fe}} + \frac{1}{\alpha_{SF4} A_{1Fe}} \quad 4.84$$

Rungon solmun AF2 yhdistää säteittäisesti ulomman vyyhdenpään tilan kohdalla oleviin solmuun AF3 vastus

$$R_{SF5} = \frac{N}{2 \pi \lambda_{Fr} h_{Fr2}} \ln \frac{d_{lo} + d_{fri}}{d_{lo} + d_{li}} \quad 4.85$$

Säteissuunnassa solmun AF2 yhdistää sisemmän vyyhdenpään tilan kohdalla olevaan solmuun AF5 vastus

$$R_{SF6} = \frac{N}{2 \pi \lambda_{Fr} h_{Fr2}} \ln \frac{d_{lo} + d_{li}}{2 d_{fri2}} \quad 4.86$$

Ulomman vyyhdenpäätilan lohkojen väliset solmut AF3, BF3, ... yhdistää toisiinsa kehän suunnassa vastus

$$R_{SF7} \approx \frac{\pi d_{Fav}}{\lambda_{Fr} (d_{Fri} - d_{lo}) h_{Fr2} N} \quad 4.87$$

Määritettäessä siirtymisresistansseja vyyhdenpäiden ilmatiloihin on parempi laskea ensin niissä tarvittavat pinta-alat. Rungosta sisemmän vyyhdenpäätilan ala on

$$A_{Frvpi} = \frac{\pi}{4 N} (d_{li}^2 - d_{Fri2}^2) \quad 4.88$$

Rungosta ulompaan vyyhdenpäätilaan on kosketuksissa pinta-ala

$$A_{\text{Frpo}} = \frac{\pi}{4N} (d_{\text{Fri}}^2 - d_{\text{lo}}^2) \quad 4.89$$

Runko yhdistyy ulomman vyyhdenpään ilmatilan solmuihin Vpo1, Vpo3, Vpo5, ... vastuksella

$$R_{\text{AF2}} = \frac{h_{\text{Fr2}}}{2\lambda_{\text{Fr}} A_{\text{Frpo}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{AF2}} A_{\text{Frpo}}} \quad 4.90$$

Myös tämä resistanssi lasketaan erikseen lohkoittain R_{BF2} , Lämmönsiirtymiskertoimet α_{BF2} , ... voidaan asettaa eri suuruisiksi. Em. kohdalta rungon toiselta puolen siirtyy ulkoilmaan lämpöä vastaavan alan läpi siirtymisresistanssilla

$$R_{\text{SF8}} = \frac{h_{\text{Fr2}}}{2\lambda_{\text{Fr}} A_{\text{Frpo}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{SF8}} A_{\text{Frpo}}} \quad 4.91$$

Runko yhdistyy sisemmän vyyhdenpään ilmatilan solmuihin Vpi2, Vpi4, Vpi6, ... vastuksella

$$R_{\text{AF4}} = \frac{h_{\text{Fr2}}}{2\lambda_{\text{Fr}} A_{\text{Frpi}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{AF4}} A_{\text{Frpi}}} \quad 4.92$$

Myös tämä resistanssi lasketaan erikseen lohkoittain R_{BF4} , Lämmönsiirtymiskertoimet α_{BF4} , ... voidaan asettaa eri suuruisiksi. Rungon ulommainen osa on kehä, joka suojaa roottoria ja johon myös jarru voidaan kiinnittää. Siitä lasketaan ensin tarvittavat pinta-alat yksinkertaistetun pinnan muodon mukaisesti. Aksiaalisuuntainen pinta-ala

$$A_{\text{Frkeh1}} = \frac{\pi}{4N} (d_{\text{Fro}}^2 - d_{\text{Fri}}^2) \quad 4.93$$

jossa d_{Fro} on ulkohalkaisija ja d_{Fri} sisähalkaisija. Rungon kehän ulkopuolisen pinnan ala

$$A_{\text{Frkeh2}} = \frac{\pi d_{\text{Fro}} h_{\text{Fr1}}}{N} \quad 4.94$$

Rungon kehän keskellä oleva säteissuunnassa oleva pinta-ala

$$A_{\text{Frkeh3}} = \frac{\pi d_{\text{Frov}} h_{\text{Fr1}}}{N} \quad 4.95$$

jossa keskimääräinen halkaisija d_{Frav} lasketaan keskiarvona ulko- ja sisähalkaisijoista.

Rungon kehän sisäpuolen pinta-ala vyyhdenpään puolelle

$$A_{\text{Frkeh4}} = \frac{\pi d_{\text{Fri}} (h_{\text{Fr1}} - h_{\text{Fr2}})}{N} \quad 4.96$$

Rungon solmun AF3 yhdistää säteittäisesti kehän solmuun AF4 vastus

$$R_{\text{SF9}} = \frac{N}{2\pi\lambda_{\text{Fr}}h_{\text{Fr2}}} \ln \frac{2d_{\text{Frav}}}{d_{\text{1o}} + d_{\text{Fri}}} + \frac{h_{\text{Fr1}}}{2\lambda_{\text{Fr}}A_{\text{Frkeh1}}} \quad 4.97$$

Kehän lohkojen välisiä solmuja AF4, BF4, ... yhdistävät vastukset

$$R_{\text{SF11}} \approx \frac{\pi d_{\text{Frav}}}{\lambda_{\text{Fr}}h_{\text{Fr1}}l_{\text{Fr}}N} \quad 4.98$$

Rungon kehältä ulkoilmaan johtaa siirtymisresistanssi

$$R_{\text{SF12}} = \frac{l_{\text{Fr}}}{2\lambda_{\text{Fr}}A_{\text{Frkeh3}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{SF12}}A_{\text{Frkeh2}}} \quad 4.99$$

Rungon keskiosassa lohkojen välisiä solmuja AF5, BF5, ... yhdistää kehän suunnassa vastukset

$$R_{\text{SF13}} \approx \frac{\pi(d_{\text{Fri2}} + d_{\text{2li}})}{2\lambda_{\text{Fr}}h_{\text{Fr3}}(d_{\text{Fri2}} - d_{\text{2li}})N} \quad 4.100$$

Rungon keskiosasta ulkoilmaan (kuva 4.9) johtaa siirtymisresistanssi

$$R_{\text{SF14}} = \frac{h_{\text{Fr3}}}{2\lambda_{\text{Fr}}A_{\text{FrkesN}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{SF14}}A_{\text{FrkesN}}} \quad 4.101$$

jossa A_{FrkesN} on laakerikeskiön raudan poikkipinta-ala rungon puoleisessa päässä

$$A_{\text{FrkesN}} = \frac{\pi}{4N} (d_{\text{dli2}})^2 \quad 4.102$$

Laakerien sisäsovittien solmun RT10 yhdistää rungon pisteisiin AF5, BF5, ... vastus

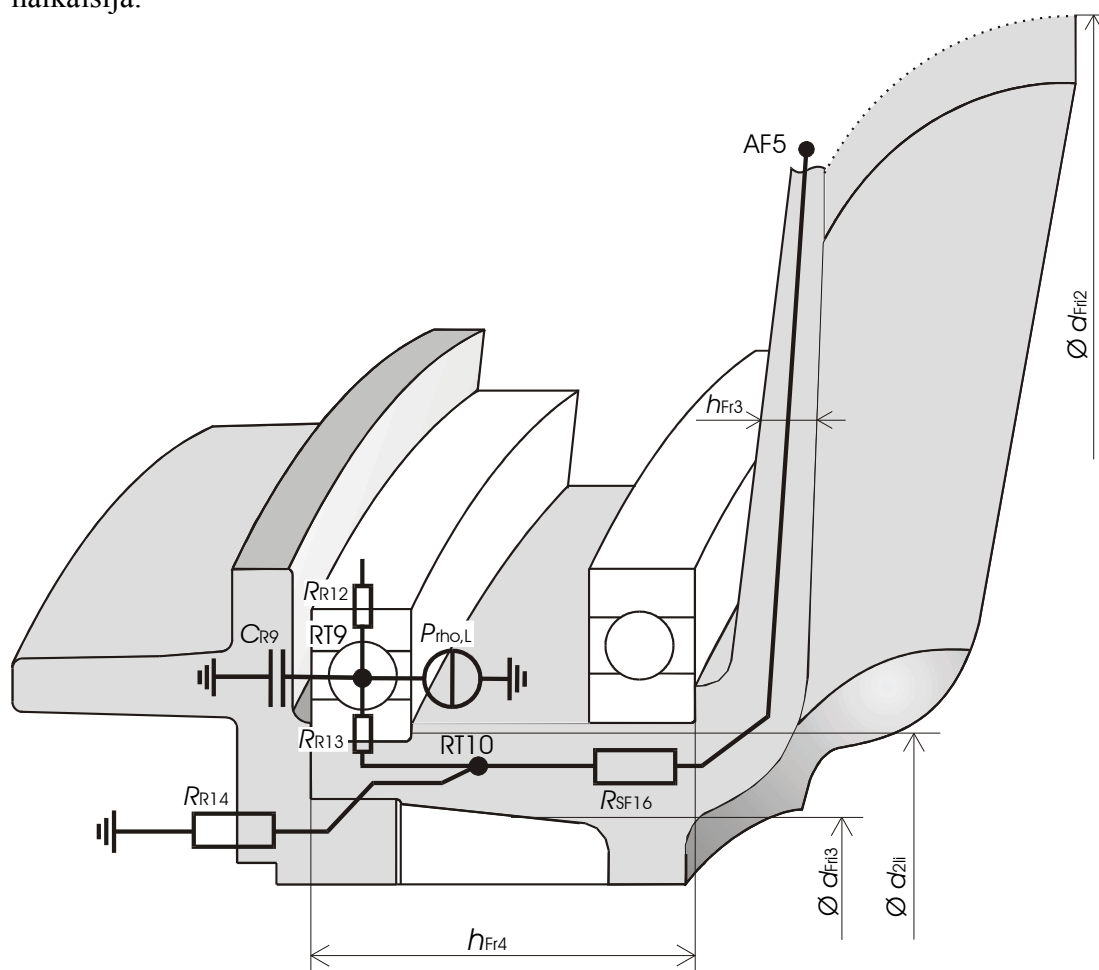
$$R_{\text{SF16}} = \frac{h_{\text{Fr4}}}{2\lambda_{\text{Fr}}A_{\text{FrkesM}}} + \frac{N}{2\pi\lambda_{\text{Fr}}h_{\text{Fr3}}} \ln \frac{d_{\text{Fri2}}}{d_{\text{2li}}} \quad 4.103$$

jossa h_{Fr4} on laakerikeskiön pituus, h_{Fr3} rungon keskimääräinen vahvuus keskiön ja staattorin välissä, sekä A_{FrkesM} on laakerikeskiön raudan poikkipinta-ala seuraavasti

$$A_{\text{FrkesM}} = \frac{\pi}{4N} (d_{2\text{li}}^2 - d_{\text{Fri3}}^2)$$

4.104

jossa $d_{2\text{li}}$ on laakereiden keskimääräinen sisähalkaisija ja d_{Fri3} keskiön sisäreiän halkaisija.



Kuva 4.9. Rungon keskiön dimensiot ja vastusverkko

Rungon lämpökapasitanssit

Rungon eri lohkoista on aikaisemmin laskettu pinta-aloja. Niiden avulla saadaan johdettua vastaavat tilavuudet. Rungossa staattorin kohdalla solmuissa AF2, BF2, ... vaikuttava lämpökapasitanssi on

$$C_{\text{SF2}} = \rho_{\text{Fe}} c_{\text{Fe}} (A_{\text{lFe}} h_{\text{Fr2}}) \quad 4.105$$

Kehän solmuissa AF4, BF4, ... vaikuttaa kapasitanssi

$$C_{\text{SF4}} = \rho_{\text{Fe}} c_{\text{Fe}} (A_{\text{Frkeh3}} 2 l_{\text{Fr}}) \quad 4.106$$

koska kehän massaa lisäävät myös kuvissa näkymättömät kiinnityspisteet ja tuki-

rakenteet moottorin kiinnittämiseksi, voidaan pituus l_{Fr} kertoa kahdella. Rungon keskiosan solmuissa AF5, BF5, ... vaikuttaa kapasitanssi

$$C_{SF5} = \rho_{Fe} c_{Fe} \left(\frac{\pi h_{Fr3}}{4 N} (d_{li}^2 - d_{2li}^2) \right) \quad 4.107$$

Laakerin sisäkehällä eli keskiön solmussa RT10 vaikuttaa kapasitanssi

$$C_{RT10} = \rho_{Fe} c_{Fe} (A_{FrkesM} N h_{Fr4}) \quad 4.108$$

4.4 Häviötehot

Moottorissa muodostuu yleensä kupari-, rauta- ja kitkahäviöitä. Lisäksi muodostuu pyörrevirtahäviöitä roottorin alumiinisessa suojalevyssä ja magneeteissa. Näiden häviöiden osuudet voidaan laskea riittävällä tarkkuudella vain elementtimenetelmää käyttävillä tietokoneohjelmilla.

Lämpömallissa nämä häviötehot kuvataan maan ja solmun välisillä virtalähteillä. Koska käytettävässä mallissa moottori jaetaan kuuteen lohkokoon, myös elementtimenetelmällä lasketut tehot jaetaan kuudella. Tarvittaessa voi kuhunkin lohkokoon lisätä häviölähteitä, kuten jarrun sähkömagneetin häviö rungon kehän solmuun.

Laaditussa mallissa rautahäviöt staattorin selässä $P_{1fe,y}$ syötetään solmuun 2 ja hampaan häviö $P_{1fe,z}$ syötetään solmuun 4 (kuva 4.3). Virran aiheuttama häviö käämilangassa jaetaan vyyhden geometrian mukaisesti uran osuuteen $P_{1cu,u}$, joka syötetään solmuun 7, sekä ulomman vyyhdenpään osuuteen $P_{1cu,vpo}$ solmuun 5 ja sisemmän vyyhdenpään osuuteen $P_{1cu,vpi}$ solmuun 6 (kuva 4.4).

Roottorin suojalevyssä ja magneettien kehyslevyssä syntyy pyörrevirtahäviöitä $P_{h,SL}$ eli solmussa RT1. Magneettiin saattaa muodostua pyörrevirtahäviö $P_{h,PM}$ solmussa RT2. Roottorin rautalevyssä muodostuu myös rautahäviöitä P_{2fe} , joka kuitenkin kestomagneetikoneessa on varsin pieni, sillä roottorin vuo on likimain vakio. Laakereiden aiheuttama kitkahäviö $P_{rho,L}$ voi kuitenkin olla merkittävä, sillä magneettien aiheuttama aksiaalisuuntainen voima on suuri. Solmu RT9 sijaitsee laakerin kuula-kehässä, johon em. häviö syötetään. Kahta laakeria käsitellään mallissa kuitenkin yhtenä kappaleena, vaikka niillä on pieni kokoero (Kuvat 4.6 ja 4.7).

Tarkasteltavana olevassa moottorissa voidaan käyttää myös sähköisesti irrotettavaa seisontajarrua. Jarrun ollessa auki muodostaa sen sähkömagneetti myös häviötehoa. Jos jarrun lämpötila on isompi kuin rungon, voidaan tämä teho $P_{h,J}$ syöttää vapaava-

linteräisesti rungon solmuihin AF4, BF4, ... riippuen jarrujen sijoituksesta lohkoihin nähden (kuva 4.8).

4.5 Lämpömallin ratkaisu

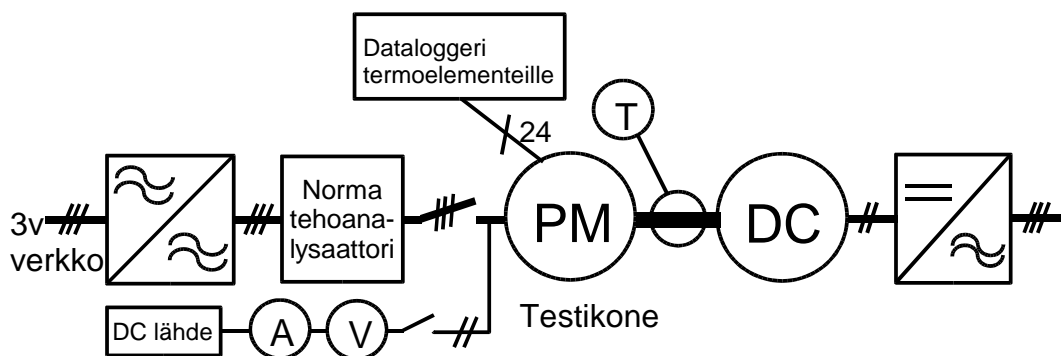
Koneen mallin jakamisesta kuuteen lohkoon ja epäsymmetriasta johtuen tulee lämpömalliin 125 solmupistettä. Malli ratkaistaan luvun 3.3 mukaisesti solmupistemenetelmällä käyttäen tietokoneohjelmia. Ensin malli on kirjoitettu Teknillisen korkeakoulun teoreettisen sähkötekniikan laboratoriossa kehitettyyn APLAC[®]-piirisimulaattoriin. Ohjelma on tarkoitettu nimenomaan elektroniikan virtapiirien suunnitteluun ja verkon komponenttien kirjoittamiseen ja kytkentä on helppo tehdä loogisesti. Samoin ohjattujen lähteiden sijoittelu muiden solmupisteiden välille on helppoa. Syöttötiedostossa *data.i* on annettu moottorin kaikki dimensiot sekä arvot häviötehoille, lämmönsiirtymiskertoimille, lämmönjohtavuuksille ja ilmapvirtauksille. Ohjelmasta on kaksi versiota *jatkuva.i* ja *askel.i*. Ensimmäinen on jatkuvan tilan ratkaisuun, jossa lähteenä on vakiohäviöt ja käytetään tasavirta-analyysiä. Toinen on jaksottaisen käytön mallintamiseen. Siinä ohjelmatiedoston ensimmäisillä riveillä pitää asettaa käyntijaksot sekä häviölähteiden kerroinvektorit, joiden mukaan häviöt käyttäytyvät ajan funktiona. APLAC[®] aloittaa transienttialyysin aina tasavirta-analyysillä alkuarvojen laskemiseksi. Muutostilojen laskenta perustuu trapetsikaavaan tai käänteiseen Euleriin sekä modifioitujen solmupisteyhtälöiden ratkaisuun.

Koska APLAC[®] ei ole yleisesti käytössä koneteollisuudessa, on malli kirjoitettu myös Matlab[®]-laskentaohjelmistoon. Ohjelmasta ei käytetä mitään toolboxeja, vaan lukujen 3.3–3.6 mukaiset lähde- ja solmupistematriisit on kirjoitettu perusohjelmaan. Tästä syystä teoriaosuudessa on kuvattu varsin yksityiskohtaisesti solmupistematriisien periaate. Erikseen on versiot jatkuvan tilan tasavirta-analyysille sekä moottorin käynnistystä, pysäytystä sekä yhtä käyntijaksoa simuloivalle aika-analyysille. Lähdetiedot luetaan tiedostosta *data.m*. Datan käsittely ja matriisien muodostus tapahtuu aliohjelmassa *laskenta.m*, sekä differentiaaliyhtälön ratkaisu aliohjelmassa *difyht.m*. Luvun 3.4 mukaisesti ohjattujen lähteiden vastukset R_q :t on sijoitettu omaan matriisiinsa $[R_u]$, joka sijaitsee *laskenta.m* aliohjelmassa. Näiden matriisien muokkaaminen on jonkin verran mutkikkaampaa verrattuna työskentelyyn APLAC[®]:ssa. Ilmanvirtauksen muuttaminen vaatii kytkennän hahmottamisen ja matriisin kirjoittamisen ensin paperilla. Tavoitteena oli kuitenkin jättää käyttäjälle vapaat kädet

ohjelman muokkaamiseen. Käyttäjä voi ohjelmoida mm. käyntijaksot itse haluamallaan tavalla.

5. Mittaukset

Mallin, sen lämpövastusten ja lämmönsiirtymiskertoimien tarkistamiseksi sekä viritämiseksi mallin antamia tuloksia verrattiin testikoneella tehtyihin mittauksiin. Tyhjäkäyntikokeella määritettiin rauta- ja kitkahäviöt, jotka varmistettiin hidastuvuuskokeella. Kuormituskokeessa mitattiin teho, virta, lämpenemät ja ilmavirtaukset jatkuvassa tilassa sekä ED 75% jaksottaiskäytössä. Kuormakoneena toimi tasavirta-generaattori, joka oli kytketty momenttiakselin välityksellä mitattavaan moottoriin. Mittausjärjestely on kuvassa 5.1. Kuormituskoe perustuu standardiin IEC 60034-1 (*Rotational electrical machines–Rating and performance, 2004*).



Kuva 5.1. Mittausjärjestely.

5.1 Häviömittaukset

Tyhjäkäyntikoe tehtiin taajuusmuuttajaa käyttäen. Virrat ovat tällöin varsin pieniä (10 % nimellisvirrasta), joten likimain kaikki teho menee rauta- ja laakerihäviöihin ja vähän roottorin pyörrevirtahäviöihin. Ilman kitkahäviöt ovat olemattomat alle 200 rpm nopeudella. Laakerihäviöt pitäisi määrittää erillisistä kalorimetrisistä testeistä. Tyhjäkäyntihäviöt varmistettiin myös pysähtymiskokeella, koska roottorin hitausmomentti tunnettiin. Häviöitä mitattiin myös sinimuotoisella jännitteellä käyttämällä konetta generaattorina nimellisvirralla, kun staattorikäämi oli yhdistetty keino-kuormaan. Testeissä kuparihäviöiden osuus kokonaishäviöistä laskettiin tunnetun käämin resistanssin ja virran avulla

$$P_{\text{CuS}} = 3 R_S I_S^2$$

5.1

jossa R_s on staattorin yhden vaiheen resistanssi ja I_s on virran tehollisarvo. Käytetyillä alle 20 Hz taajuuksilla ei oletettavasti virranahtoa merkittävästi esiinny.

Kestomagneetin, suojalevyn häviöt ja rautahäviöt staattorissa, sekä roottorissa määritettiin vastaavan tehoisen radiaalivuokoneen 2D-FEM-laskentatuloksien avulla. Tulosten perusteella roottorihäviöt ovat niin pienet, että magneetit sekä niiden kehyslevy jäävät mallissa aina muutaman asteen mittausta kylmemmäksi. Teholaskennan tarkkuus ei myöskään ole täysin luotettava. Laakerihäviöt laskettiin valmistajan työkalulla (www.skf.com). Laskentatuloksien tyhjäkäyntihäviöiden summa vastasi mitattua tyhjäkäyntitehoa.

5.2 Kuormituskoe

Lämpötilojen tarkka määrittäminen voidaan tehdä vain kuormituskokeessa, jossa kone kuormitetaan nimellisellä kuormalla niin kauan, että lämpenemä on tasoittunut ja muuttuu alle kaksi kelviniä tunnissa. Lämpötilat mitattiin termoelementeillä moottorin rungosta, staattorista, vyyhdenpäistä, laakereista sekä roottorista. Mittauspisteitä oli ympäristön lämpötilan lisäksi 28 kpl. Näiden tarkempi sijoittelu on kerrottu liitteessä 2.

Vyyhdenpäissä sekä vyyhdenpäiden ilmatiloissa mittaus suoritettiin kolmesta eri sektorista. Mitattaessa ilmeni, että on tarpeellista asentaa useampia antureita, sillä muutaman anturin kiinnitys oli selvästi epäonnistunut. Varsinkin ilmatilassa olevien antureiden näyttämät saattoivat vaihdella jopa 15 astetta. Yhden anturin antaessa poikkeava lukema, jätettiin se huomioimatta. Ulomman vyyhdenpään ilmatilassa olevien antureiden sijoitus on hyvin merkitsevä, sillä hyvin hitaasti liikkuvan ilman tapauksessa pitäisi anturin keskiarvoistaa ilman lämpötilaa isommalta alalta.

Kone pysäytettiin vasta kun rungon lämpötila vakiintui em. tavalla. Koneen pysähtyttyä mitattiin käämityksen keskimääräinen lämpenemä vastusmittauksella käyttäen erityistä milliohmimittaria. Koska kuparin resistanssin lämpötilariippuvuus tunnetaan varsin tarkasti, saadaan lämpenemä yhtälöstä (IEC60034-1)

$$\theta_{ka} = \left(\frac{R_{2m} - R_{1m}}{R_{1m}} \right) (235^\circ \text{C} + t_1) + t_1 - t_a \quad 5.2$$

jossa R_{2m} on kuumana mitattu resistanssi, R_{1m} on kylmänä mitattu resistanssi lämpötilassa t_1 (celsiusta). t_a on sisään menevän jäähdytysilman eli ympäristön lämpötila (celsiusta) ennen pysäytystä. Tarkka tulos saadaan mittaamalla em. resistanssia 4

minuutin ajan ja sitten ekstrapoloiden muutos pysäytyshetkeen puolilogaritmisella asteikolla. Lisätieto rungon pinnan lämpötilajakaumasta saatiin lämpökameran kuvasta.

Lämpökapasitanssien määrittämistä varten mitattiin dataloggerilla lämpenemätrendi koko lämmityksen ajalta. Tuulettimella jäähdytetyn koneen ilmanvirtausnopeudet mitattiin joka lohkon kohdalla staattorin selässä, sisä- ja ulkovyyhdessä.

6. Laskettujen ja mitattujen lämpenemien vertailu

Pelkkien kirjallisuudesta saatujen kertoimien avulla ei lämpömalli anna yleensä riittävän tarkkaa kuvaa koneesta. Mitattujen lämpötilojen perusteella pitää mallia virittää eli korjata lämmönsiirtymiskertoimia vastaamaan todellista tilannetta. Kyseiselle konstruktiolle ei tietävästi aikaisemmin ole tehty analyyttistä lämpömallia, johon tuloksia voisi verrata.

Roottori- ja laakerihäviöiden määrittäminen jäi ainoastaan laskentaan perustuvaksi. Lasketulla häviöteholla laakerisovitteet ovat aina noin 3 astetta kuumemmat kuin mitatut. Pienennettäessä häviötä lasketusta noin 20 % lämpenemä on mitatun kaltainen. Oletettujen roottorihäviöiden osuus kokonaishäviöistä on vain 4 % ja laakerihäviöiden 7 %, joten niiden merkitys kokonaisuuden kannalta on vähäinen kuten luvussa 6.1 todetaan.

Konvektion ja säteilyn huomioivat lämmönsiirtymiskertoimet piti noin kaksin- tai kolminkertaistaa arvioituista, jotta malli antaisi kohtuullisella tarkkuudella mitatut lämpötilat. Todennäköisesti lämpöä luovuttavat pinnat ovat oletettua karheampia. Ainakin rungossa ja roottorissa on pinta-alaa lisääviä puolia ja olakkeita, joita mallissa ei ole huomioitu. Mallin säädössä eli virityksessä merkittävämpiä aseteltavia lämmönsiirtymiskertoimia ovat vyyhdessä, staattorin selän, rungon sisäpinnan, sekä rungon ulkopinnan kertoimet. Kertoimet on eritelty liitteessä 3. Viritys on tehty erilaiseksi tuulettamattomalle ja tuulettetulle koneelle.

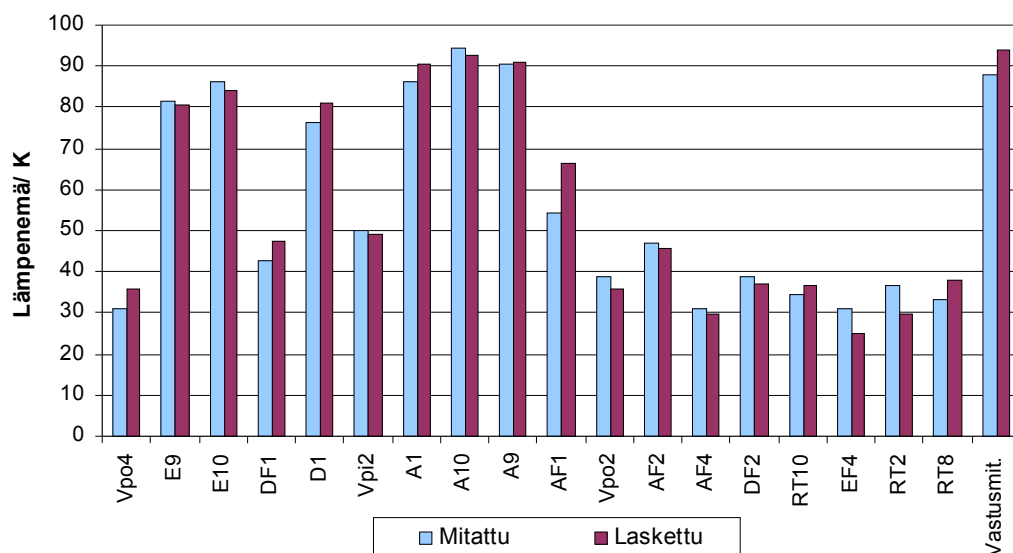
6.1 Pysyvän tilan lämpenemäerot ilman tuuletusta

Perusmallissa ei ole pakotettua puhallinjäähdytystä. Ensisijaisesti on verrattu ilman puhallinta olevan koneen mitattua ja laskettua lämpenemistä pyörimisnopeudella 160 rpm. Nopeuden ollessa näin pieni ei se juurikaan vaikuta jäähtymiseen. Ohjatut lähteet aseteltiin mittauksen perusteella ulompaan vyyhdessä ilmatilaan ja staattorin selkään alhaalta ylöspäin, koska koneen yläpuolisko on noin 3 – 6 astetta alapuoliskoa kuumempi, kuten kuvassa 6.1 AF2 ja DF2. Virtaus ei ollut mitattavissa, mutta

malli on viritetty pienellä nousevalla virtauksella, joka on vyyhdenpäätilassa $0,3 \text{ dm}^3/\text{s}$ ja selässä $0,1 \text{ dm}^3/\text{s}$.

Kiinnityspalan kosketusvastusta joutui pienentämään arvoon $500 \text{ W/m}^2\text{K}$, sillä tuuletamattomassa tapauksessa staattorin ja rungon välisessä ilmatilassa (AF1) olevat termoelementit antavat edelleen 10 – 15 astetta pienempiä lämpötiloja kuin mallin antamat arvot, kuten kuvassa 6.1 voidaan huomata. On todennäköistä, että anturit jäähtyivät runkoon poratun kiinnityksensä kautta kylmempään rungon rautaan.

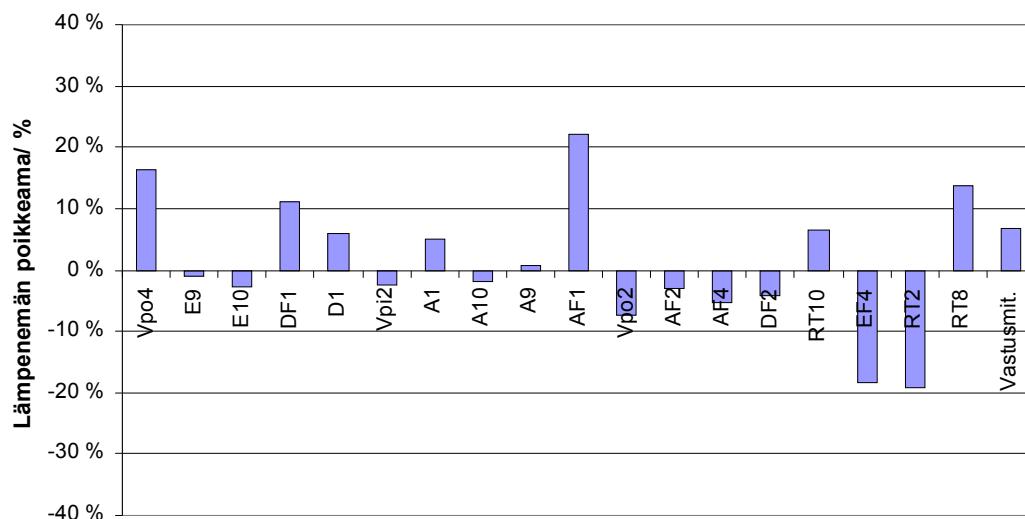
Kaikkiaan on verrattu 26:a mitattua ja laskettua lämpötilaa. Koska osa niistä on hyvin lähellä toisiaan (esim. Vpi2, Vpi6, Vpi8), käsitellään tässä 19:ää lämpenemää. Mitatuista lämpötiloista on vähennetty ympäristön lämpötila. Koska em. sisemmän vyyhdenpään lämpötilat ovat varsin samansuuruisia, osoittaa se että roottorissa olevat puolat todennäköisesti sekoittavat ilmaa vyyhdenpään ympärillä.



Kuva 6.1. 460 Nm kuormituksella mitatut ja simuloidut lämpenemät. A9 ja E9 ovat ulkovyyhdenpäässä ja A10 ja E10 ovat sisävyyhdenpäässä. AF1 ja DF1 ovat staattorin ilmatilassa. A1 ja D1 ovat staattorin selässä. Vpo4 ja Vpo2 ovat ulomman vyyhdenpään ilmassa ja Vpi2 on sisemmän vyyhdenpään ilmassa. AF2 ja DF2 ovat rungossa staattorin kohdalla. AF4 ja EF4 ovat rungon kehällä sekä RT10 keskiössä. RT2 on magneetti ja RT8 laakerin ulkokehä.

Mallissa laskettu käämin keskimääräinen lämpenemä on järjestelmällisesti 5 – 7 astetta kuumempi kuin vastusmittauksella mitattu arvo (kuva 6.1). Syynä voi olla mittalaitteen systemaattinen virhe tai todennäköisemmin epätarkkuus lähtötiedoissa. Sekä sisä-, että ulkovyyhdenpäiden pituudet on arvioitu käämitystä purkamatta, joten niiden suhteessa voi olla jopa 20 % virhe. Käämin lämpenemän virhe vastusmittaukseen nähden on 7 % (kuva 6.2). Jos malli säädettäisiin ko. lämpötilan mukaan, olisivat kaikki staattorin ja vyyhdenpään pinnasta mitatut lämpötilat jopa 5 astetta

korkeampia kuin mallista saadut arvot. Nyt em. solmut A9, A10, E9 ja E10 on viritetty hyvin lähelle mitattua arvoa kuten kuvassa 6.2 on nähtävissä. Kuvassa magneetin ja niiden kehyslevyn (RT2) lämpenemä on testikoneessa isompi ja laakerin (RT8) pienempi kuin mallin arvot. Niiden tehot perustuvat ainoastaan laskelmiin. Laakerin lämpenemävirhe on hyvin pieni 20% pienemmällä häviöteholla



Kuva 6.2. Viritetyn lämpömallin poikkeamat mitatuista arvoista niin, että positiivisissa pylväissä malli antaa suuremman arvon. Luultavasti roottorin alumiinin häviöt ovat isommat solmussa RT2.

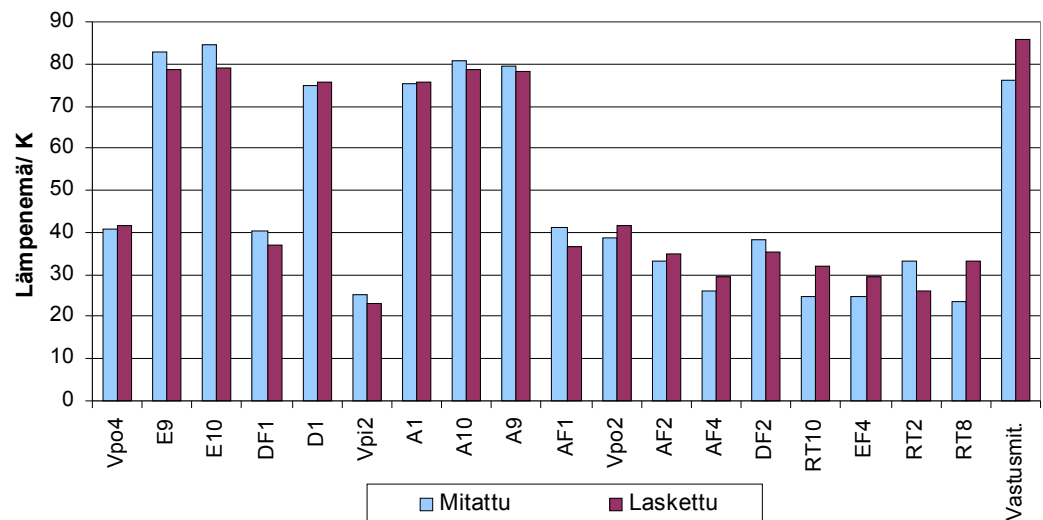
6.2 Pysyvän tilan lämpenemäerot ulkopuolisella tuuletuksella

Konetta mitattiin myös ulkopuolisella puhaltimella varustettuna. Tällöin samalla staattorikämin lämpenemällä voidaan konetta kuormittaa 20 % enemmän. Koneen vyyhdenpäiden ilmatiloista mitattiin virtausnopeuksia, mutta mittaus ei antanut vastausta ilman virtaussuunnasta. Vertailtaessa ilmasolmujen lämpötiloja tuulettamattomaan tapaukseen, voi niiden jäähtymisen perusteella päätellä ilman jakaantumista koneen sisäosissa. Lämmönsiirtymiskertoimet aseteltiin uudelleen tuulettulle tapaukselle.

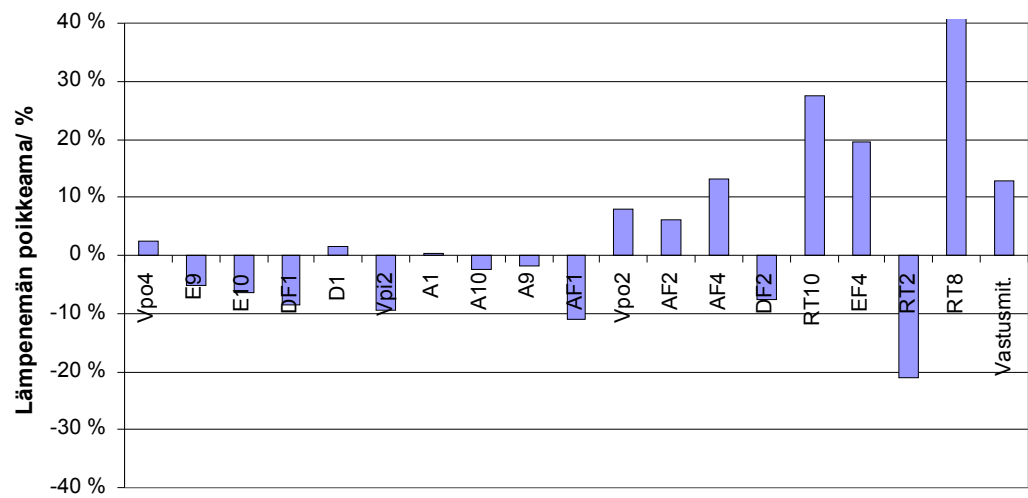
Suurin osa jäähdytysilman virtauksesta ($5,4 \text{ dm}^3/\text{s}$) menee suoraan staattorin selän solmuihin xF1. Mallissa oletettiin sen jakaantuvan tasan säteittäisesti jokaiselle staattoriselän lohkolle osan mennessä ilmavälin läpi. Staattorin selästä ilma virtaa ulomman vyyhdenpään solmuihin Vpo 1, 3, 5, ..., josta edelleen ulos. Pieni osa ($0,2 \text{ dm}^3/\text{s}$) ilmasta jäähdyttää sisemmän vyyhdenpään ilmatilassa olevia solmuja Vpi xx. Näistä solmuista $1,2 \text{ dm}^3/\text{s}$ ($6 \cdot 0,2$) virtaa ilmavälin AG1 läpi solmuihin Vpo 2, 4, 6, ... solmuihin ja sieltä ulos. Lämpömallin ohjatut lähteet muutettiin vastaamaan

puhallusilman virtausta.

Staattorikäimin keskimääräinen lämpenemä poikkeaa vastaavasti kuin tuulettamattomassa tapauksessa (kuva 6.3). Staattorin ja vyyhdenpäätilojen lämpenemäerot ovat hyvin pienet (kuva 6.4). Kuvan mukaan laakerihäviöiden osuus aiheuttaa merkittävää virhettä solmuihin RT8 ja RT10 kuten ilman tuuletinta. Myös roottorialumiini ja magneetti (RT2) ovat viileämpiä.



Kuva 6.3. 530 Nm kuormituksella mitatut ja mallinnetut lämpenemät käyttäen ulkopuolista puhallusta.



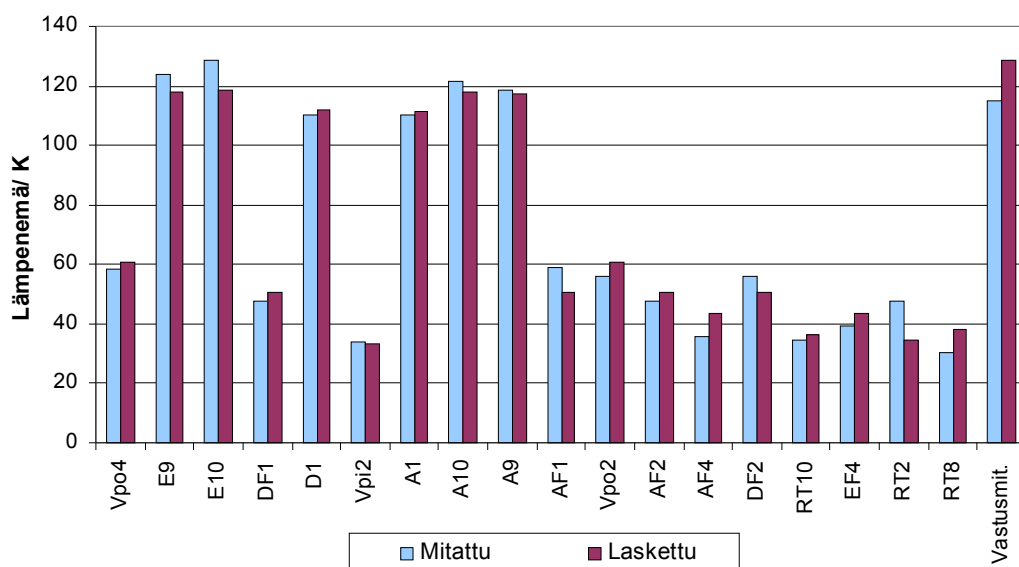
Kuva 6.4. Viritetyn lämpömallin poikkeamat mitatuista arvoista niin, että positiivisissa pylväissä malli antaa suuremman arvon. Roottorin osalta (RT2, RT8, RT10) tilanne vastaa hyvin paljon tuulettamattomaa tapausta.

Koska moottoria käytetään usein myös jaksottaisessa käytössä, testattiin mallin toimivuus tässäkin tapauksessa. Moottoria käytettiin S3:a vastaavalla ED 75 % ajoitaiskäyttökertoimella ja varustettuna tuuletuksella. Pysyvä tila ($\Delta\theta < 2$ K/h) saavu-

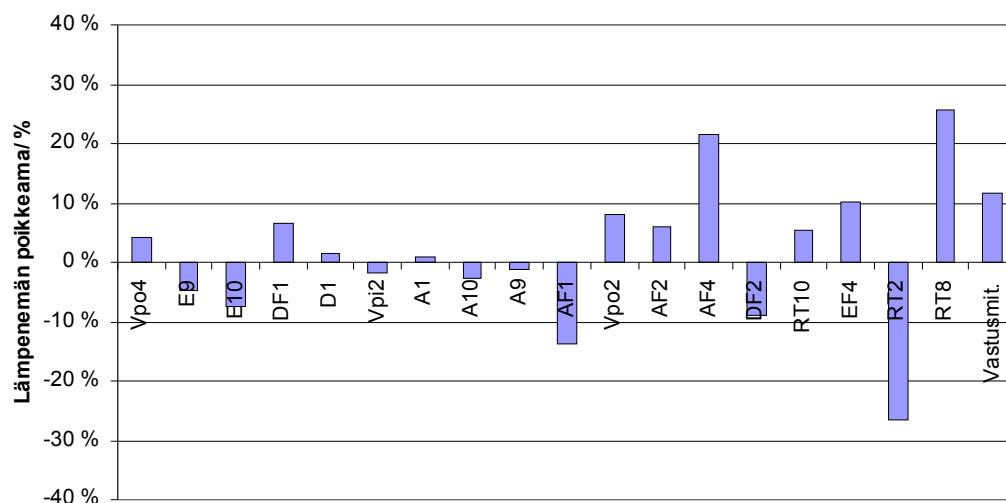
tettiin kolmen tunnin kuluttua momentin ollessa 750 Nm. Testikoneen käynnistys ja pysäytys eivät sanottavasti lämmittäneet konetta, sillä se käynnistyi kuormittamattomana. Tyhjäkäyntihäviöt ovat tässä tapauksessa $\frac{3}{4}$ verrattuna jatkuvaan käyttöön. Kuparihäviöt aiheuttava tehollinen virta lasketaan ajoittaiskäyttökertoimen ja kuormitusilanteessa olevan virran I_s avulla (Luomi 2005)

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{75}{100} I_s^2} \quad 6.1$$

Lämpenemä oli isolla momentilla suurempi (kuva 6.5). Mallinnetut ja mitatut lämpenemät poikkesivat samanlaisesti kuin jatkuvassa käytössä (kuva 6.6).



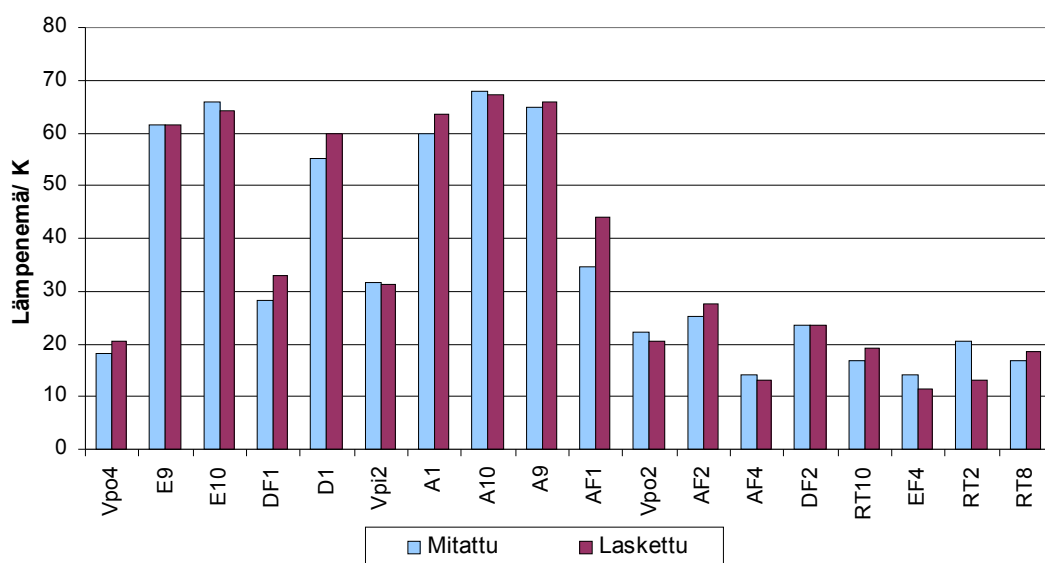
Kuva 6.5. 750 Nm kuormalla ED 75 % käytössä lämpenemissä on hieman isompia eroja.



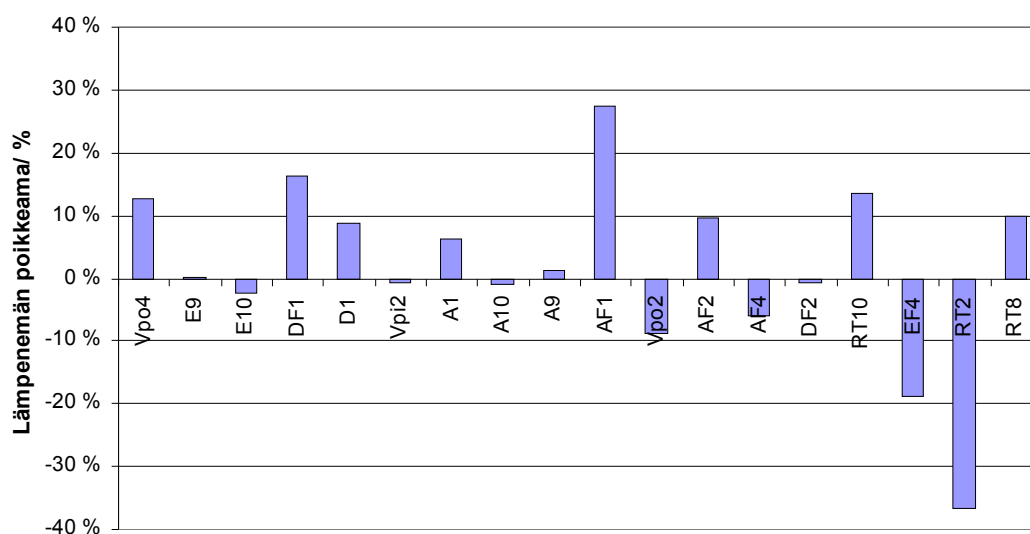
Kuva 6.6. Mallinnettujen arvojen suhteelliset poikkeamat mitatuista arvoista niin, että positiivisissa pylväissä malli antaa suuremman arvon.

6.3 Lämpenemän nousu käynnistyksen jälkeen

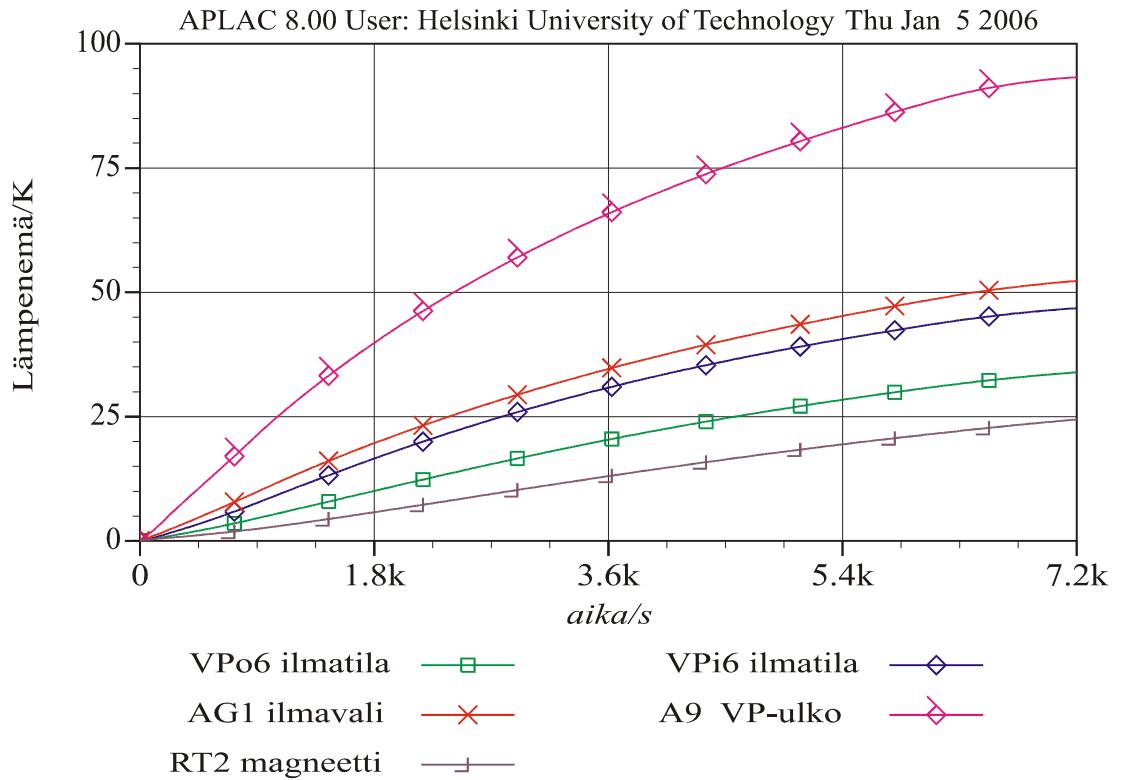
Moottoria käytetään usein ajoittaiskäytössä, jossa lämpökapasitansseilla on vaikutusta koneen lämpenemätasapainoon. Lämmitysvaiheessa ei käytetty puhallinta. Laskettujen kapasitanssien suuruuksia ei tarvinnut muuttaa, sillä ne oli määritetty varsin hyvin. Lämpötilaerot ovat metalliosissa hyvin pienet mallinnettaessa käynnistystä yhden tunnin ajan, kuten kuvissa 6.7 ja 6.8 voidaan havaita. Ilmatilassa olevissa solmuissa (AF1 ja DF1) on isompia eroja. Kuormitus vaihteli hieman, mutta virran ja staattoriresistanssin testin aikaiset muutokset on otettu huomioon laskennan lähtöarvoissa (kuva 6.10).



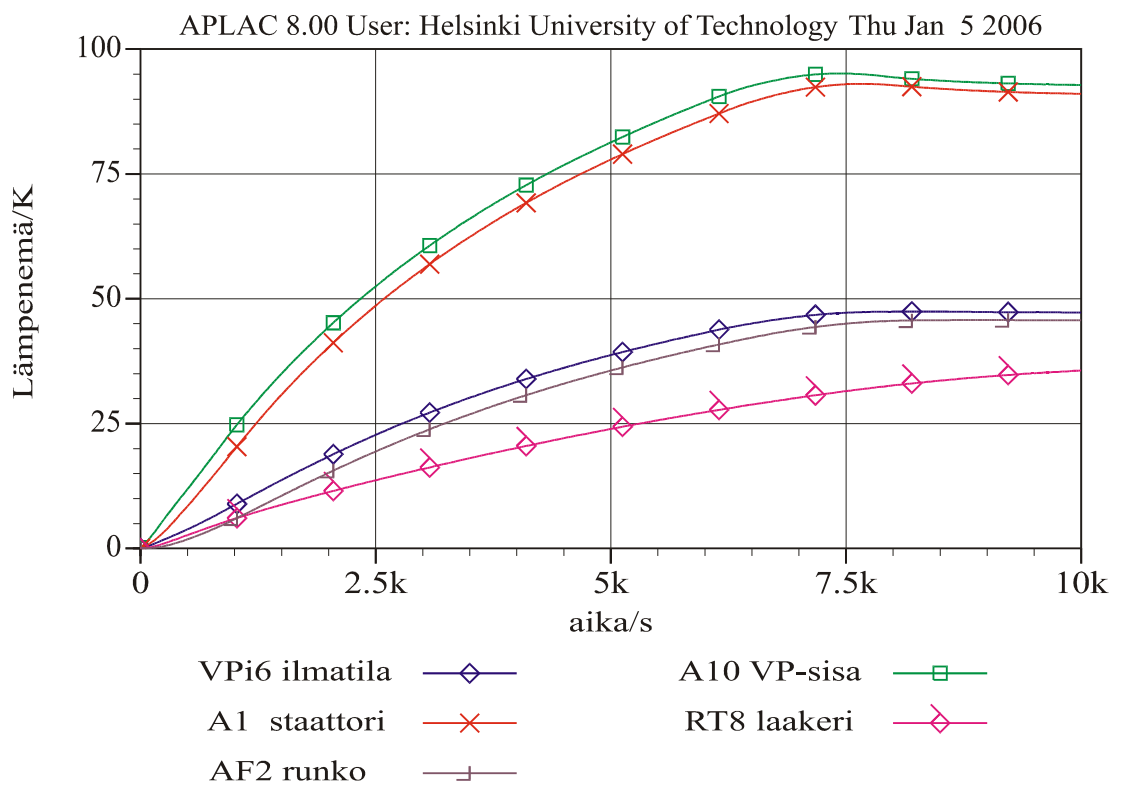
Kuva 6.7. Ensimmäisen tunnin aikana on loppulämpötilasta saavutettu noin 80 %. Kuormitus on noin 460 Nm ja sen portaittainen vaihtelu on huomioitu lähtöarvoissa.



Kuva 6.8. Tunnin kuluttua staattorin lämpenemät vastaavat hyvin laskettuja. Positiivisissa pylväissä malli antaa suuremman arvon. Magneetti lämpenee nopeammin.



Kuva 6.9. Mallinnettu lämpenemä kahden tunnin ajalta.

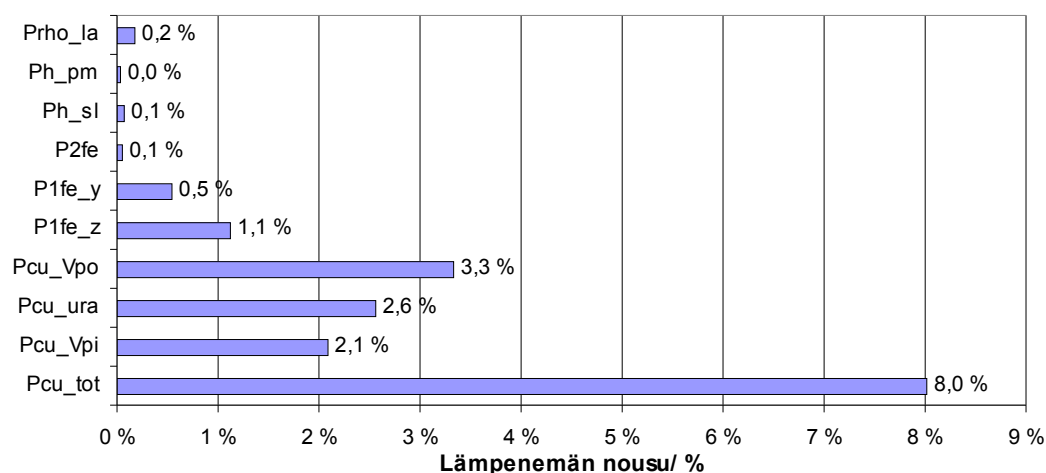


Kuva 6.10. Mallinnettu lämpenemä vajaan kolmen tunnin ajalta. Kahden tunnin jälkeen kuormaa pienennettiin 550 Nm:stä 450 Nm:iin, jolloin vyyhden lämpötila laski muutaman asteen, mutta runko pysyi vakaana.

6.4 Herkkyystarkastelu

Tehtyjen mittausten ja mallin virityksen jälkeen lämpömallilla testattiin häviöiden, lämmönsiirtymiskertoimien ja ilmavirtauksen vaihtelun vaikutusta lämpenemään. Kutakin häviökomponenttia on suurennettu ja pienennetty 10 % ja laskettu vastaava staattorikäämin lämpenemän suhteellinen muutos. Muutokset olivat yhtä suuria, mutta vastakkaismerkkisiä isommalla ja pienemmällä teholla. Siksi kuvaajassa on esitetty vain lämpenemää kasvattava suunta.

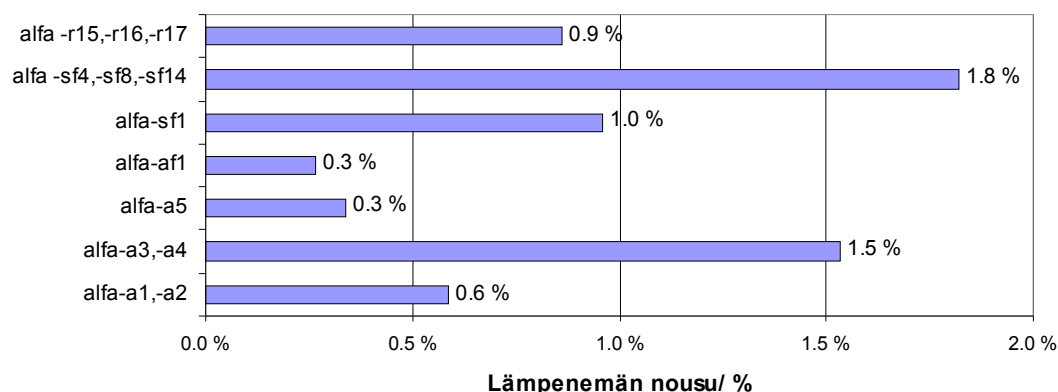
Kuparihäviöillä on ymmärrettävästi suora kytkentä lämpenemään (kuva 6.11). Kuten aikaisemmin oli todettu, ei laakeri- ja roottorihäviöillä ole merkittävää vaikutusta käämityksen lämpenemään. Niissä syntyvä lämpö poistuu pääasiassa roottorin selän ja keskiön kautta koneen toiselle puolelle.



Kuva 6.11. 460 Nm kuormalla on kuormitushäviöiden Pcu osuus kokonaishäviöistä 72% ja tällöin niiden merkitys on suuri. Staattorin rautahäviöiden P1fe osuus on 16 %. Roottorihäviöillä Ph_pm, Ph_sl ja P2fe ei ole sanottavaa merkitystä staattorikäämin lämpenemään.

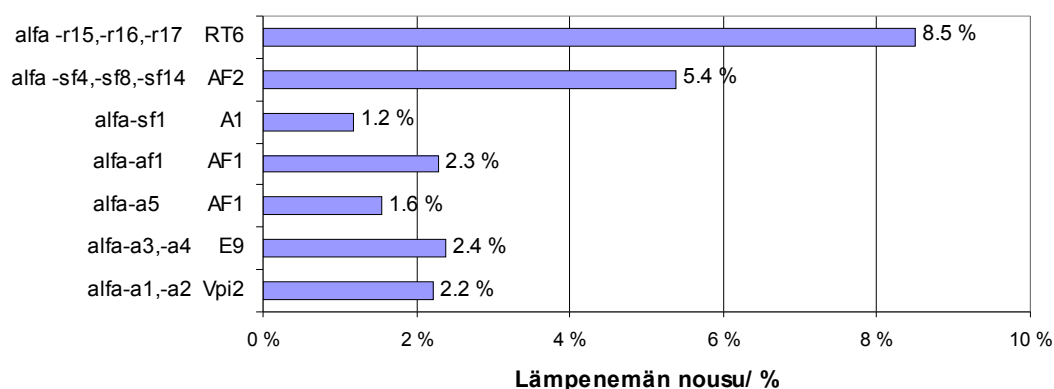
Lämmönsiirtymiskertoimia ei voi määrittää pelkästään laskemalla. Määritettäessä näitä kertoimia mittausten avulla voivat mittausvirheet vaikuttaa ratkaisevasti. Tarkasteltavaksi on valittu kertoimet, joilla on suoranainen vaikutus myös käämin keskimääräiseen lämpenemään. Tuulettamattomassa koneessa testattiin 10 % isomman ja pienemmän kertoimen vaikutusta. Muutokset olivat vastaavasti yhtä suuria, mutta vastakkaismerkkisiä isommalla ja pienemmällä kertoimella. Vyyhdenpään kerrointen α_{a1} ja α_{a2} vaikutus näkyy voimakkaasti sisemmän vyyhdenpään ilmatilan lämpenemässä, kuten kuvassa 6.12 voi havaita. Vyyhdenpään kerrointen α_{a3} ja α_{a4} vaikutus näkyy ulommassa ilmatilassa ja tietysti kaikki em. kertoimet vaikuttavat myös käämin lämpenemään. Häviöt poistuvat koneesta pääasiassa staattorin selän ja

rungon kautta, joten näiden pintojen kertoimet vaikuttavat merkittävästi koneen staattorin keskimääräiseen lämpenemään (kuva 6.12).



Kuva 6.12. Rungon ulkopinnan kertoimien (alfa-sfx) yhtäaikaisella muutoksella on suurin vaikutus staattorin lämpenemiseen tuulettamattomassa koneessa.

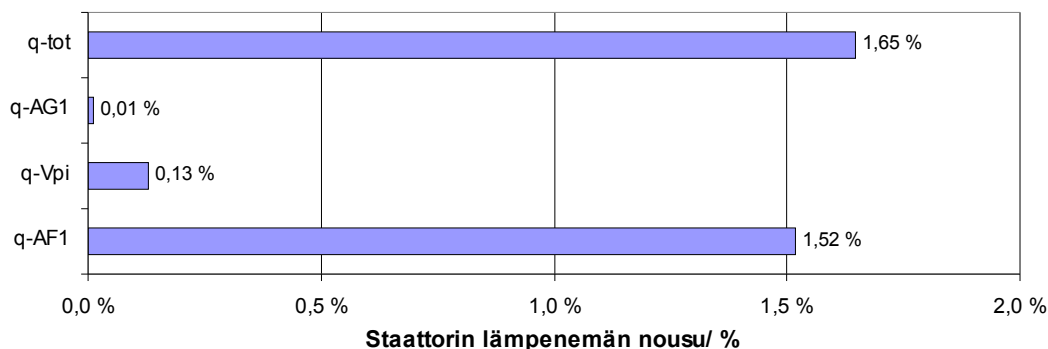
Staattorin selän α_{a5} , rungon sisäpinnan α_{af1} kerrointen vaikutus näkyy ensisijaisesti ilmatilan solmussa AF1 ja myös staattorin selän solmussa 1 (kuva 6.13). Solmun AF1 lämpenemään vaikuttaa varsin merkittävästi myös kiinnityspalan kosketusvastus α_{a5} . Kaikkien rungon ulkopinnan kertoimien yhtäaikainen muutos α_{sf4} , α_{sf8} , α_{sf12} ja α_{sf14} vaikuttaa eniten koneen staattorin keskimääräiseen lämpenemään. Muutos on nähtävissä erityisesti rungon staattorin kohdalla olevissa solmussa AF2, joissa 10 % pienemmällä kertoimella lämpenemä nousee 5,4 %. Roottori- ja laakerihäviöt poistuvat pääasiassa roottorin selän kautta, joten roottorin pinnan kertoimet α_{r15} , α_{r16} , α_{r17} yhdessä vaikuttavat merkittävästi nimenomaan roottorin solmuihin kuten kuvassa 6.13 voidaan havaita.



Kuva 6.13. Muutettu kerroin ja se solmupiste, jossa muutoksen vaikutus on voimakkain. Roottorin ja rungon ulkopinnan kertoimien vaikutukset ovat merkittäviä.

Tuuletetussa koneessa kertoimien vaikutus on likimain sama kuin tuulettamattomassa koneessa. Tuuletuksen lisääminen nykyisestä ei lisää paljoakaan kuormitet-

tavuutta. Testatun tuuletuspuhaltimen avulla voi momentti olla 20 % isompi. 10 % voimakkaammalla virtauksella q_{tot} saavutetaan 1,6 % alempi staattorinkäämin lämpenemä (kuva 6.14) ja 50 % suuremmalla tuuletuksella 9 % alempi lämpenemä vastaten 4 % kuormitettavuuden lisäystä. Sisävyöhydenpään q_{Vpi} virtaus on niin pieni, että sen vaikutus lämpenemään on myös pieni. Ilmavälin virtauksen q_{AG1} lisäys ei vaikuttanut juuri mitään staattorin lämpenemään kuten kuvassa 6.14 voidaan havaita.



Kuva 6.14. Kokonaisvirtauksen q_{tot} ja selän osuuden q_{AF1} vaikutus koneen lämpenemään on suurin. Näiden tilavuusvirta on myös suurin.

7. Yhteenveto

Aksiaalisuuntaista vuota käyttävälle moottorikonstruktiolle laadittiin kirjallisuuden perusteella analyttinen lämpöverkko, jolla voidaan mallintaa lämpenemistä moottorin eri osissa. Mallia voidaan käyttää sekä jatkuvan käytön, että ajoittaiskäytön mallinnukseen.

Tarkka häviöiden tunteminen on edellytys mallin tarkkuudelle. Työhön ei kuulunut häviöiden laskemista, joten mallia sovitettiin pääasiassa mittauksin määritellyin häviöin. Vastaavantehoisen radiaalivuokoneen teholaskelmilla pystyttiin jakamaan rautahäviöt hampaan, selän ja roottorin osuuteen, sekä laskemaan roottorin magneetin, kehyslevyn ja suojalevyn häviöt. Häviöt tulisi laskea kyseiselle rakenteelle elementtimenetelmällä.

Malli mahdollistaa epäsymmetrisen rakenteen tarkastelun. Se muodostuu kuudesta lohokosta, joille voidaan antaa erilaiset ilmavirtaukset, lämmönsiirtymiskertoimet ja tehot. Roottori on yhtenäinen pyörähdyssymmetrinen kappale. Parametrien viritys on tehty symmetriaa hyväksi käyttäen sekä tuulettamattomalle, että tuuletetulle moottorille. Käyttäjä voi muokata ohjattujen lähteiden paikkaa jäähdytystavan mukaisesti.

Mallin virittämiseksi tarvittavat mittaukset tehtiin vain yhdellä moottorilla käyttäen

yhtä pyörimisnopeutta. On mahdollista, että kosketuslämpövastuksissa ja staattori-resistansseissa on yksilökohtaisia eroja. Anturoinnin tekemisessä pitää noudattaa suurta huolellisuutta. Tarkkuuden parantamiseksi pitäisi mittauksia toistaa muilla koneilla, jotka tulisi varustaa erilaisella anturoinnilla. Vyyhdenpään anturin pitäisi olla vyyhden sisällä ja magneettikenttä häiritsi termoelementin heikkoa signaalia. PT100- tai NTC-anturin häiriönsietokyky on parempi.

Herkkyysanalyysissä todettiin häviöiden muutoksen voimakas vaikutus lämpenemään. Pinnan lämmönsiirtymiskertoimet vaikuttavat voimakkaasti koko koneen lämpenemään. Haluttaessa koneesta enemmän tehoa auttaa puhalluksen käyttö, mutta puhaltimen suurentaminen testatusta yksilöstä ei paljoa auta. Pinnan rivotus todennäköisesti parantaisi jäähtymistä.

Mallilla voidaan käsitellä jatkuvaa käyttöä, muutostilaa ja jaksottaista käyttöä. APLAC®- ja Matlab®-ohjelmiin voidaan lisätä erilaisia jaksottaisia syötteitä ja syklejä. Malli on viritetty erikseen sekä tuulettamattomassa, että tuuletetussa tapauksessa jatkuvan S1 käytön mukaan, mutta mittauksissa lämpökapasitanssien toiminta muutostilassa todettiin tarkaksi.

Lähdeviitteet

Gotter G: *Erwärmung und Kühlung elektrischer Maschinen*. Springer-Verlag, 1954

Hakala H: *Integration of Motor and Hoisting Machine Change the Elevator Business*, Proceedings of International Conference on Electrical Machines, ICEM2000, Helsinki Finland, 28-30 August 2000, Vol. 3, pp.1242-1245

Huntsman Araldite: <http://www.huntsman.com/structural-adhesives>, viitattu 15.8.2005

IEC 60034-1 *Rotational electrical machines – Part1: Rating and performance*, 2004

Incropera F.P., Witt D.P: *Fundamentals of heat and mass transfer*. 3rd ed., JohnWiley & Sons, Inc., Canada, 1990

Jokinen T: *Sähkölaitteiden tuotekehittely*. Otatiedon moniste 323, 1972. Tähän liittyy myös julkaisematonta opetusmateriaalia

Jokinen T., Saari J: *Modelling of the coolant flow with heat flow controlled temperature sources in thermal networks*. IEE Proceeding-Electrical Power Applications, Vol 144, No 5, September 1997

Kaltenbacher M., Saari J: *An asymmetric thermal model for totally enclosed fan-cooled induction motors*. TKK, Sähkömekaniikan laboratorion raportti 38, 1992

Kane magnetics: <http://www.kanemagnetics.de>, viitattu 20.8.2005

Kokkonen A: *Kuristimien lämpötekniinen mallinnus*. Diplomityö, TKK Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, 2002

Koncar R: *Technical Handbook*. Ognjen Prica, Zagreb, Yugoslavia, 1984

Kotrba V: *Cooling and Ventilation of Electrical Machines*. Licensiaattikurssin oppimateriaali, TKK Sähkömekaniikan laboratorio, 1993

Koziej E: *Cooling and Heating of Electrical Machines*. Licensiaattikurssin oppimateriaali, TKK Sähkömekaniikan laboratorio, 1989

Kylander G: *Thermal modelling of small cage induction motors*. Technical Report No. 265, Chalmers University of Tecnology, 1995

Luomi J: *Sähkökäyttöjen suunnittelu*. Opintojakson S-81.320 opetusmoniste, TKK Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, 2005

Mbidi D.N, K. Van der Westhuizen, Wang R., M.J. Kamper, Blom J: *Mechanical Design Considerations of a Double Stage Axial-Flux PM Machine*, Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE Volume 1, 8-12 Oct. 2000

Parviainen A: *Desing of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines*. Acta Universitatis Lappeenrantaensis No. 208, 2005

Putkonen T: *Epätahtikoneen dynaaminen lämpömalli*. Diplomityö, TKK Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, 1995

Saari J: *Thermal Modelling of High-Speed Induction Machines*. Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series No 82, 1995

SKF Group: www.skf.com, viitattu 2.9.2005

Valtonen M: *Opintojakson S-55.141 Piirianalyysi I opetusmonisteet*. TKK Sähkötekniikan osasto, 1997

Yang Y-P, Luh Y-P, Cheung C-H: *Design and Control of Axial-Flux Brushless DC Wheel Motors for Electric Vehicles—Part I: Multiobjektive Optimal Design and Analysis*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40 No. 4 July 2004

Materiaalitietoja

Taulukko L1.1. Käytettyjä materiaalien lämmönjohtavuuksia

<i>Materiaali</i>	λ [W/mK]	<i>Lähde</i>
Levysydän	40	Saari J
Teräs	58	Saari J
Kestomagneetti	9	Kane
Kuparilanka	395	Koncar R
Alumiini	210	Koncar R
Langan emalieriste	0,21	Koncar R
Uraeriste	0,2	Parviainen A
Magneetin liima	0,34	Huntsman
Ilma	0,024	Koncar R

Taulukko L1.2. Käytettyjä koneiden osien kosketusresistansseja

<i>Materiaali</i>	λ [W/mK]	<i>Lähde</i>
Alumiini-roottorirauta	700	Saari J
Alumiini-Alumiini	700	Saari J
Uraeristeessä	300	Saari J
Kiinnityspalasta runkoon	700	Saari J

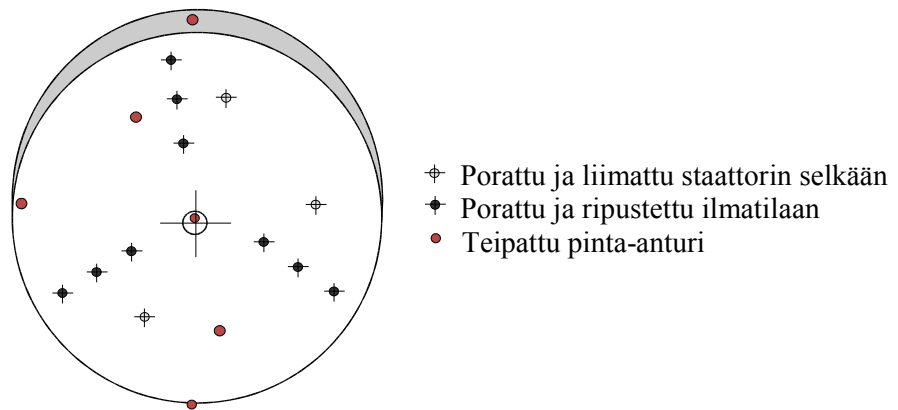
Taulukko L1.3. Käytettyjä materiaalien ominaislämpökapasiteetteja ja tiheyksiä

<i>Materiaali</i>	c_p [kJ/kgK]	ρ [kg/m ³]	<i>Lähde</i>
Levysydän	0,461	7800	Koncar R
Teräs	0,540	7800	Koncar R
Kestomagneetti	0,420	7500	Kane
Kuparilanka	0,385	8960	Koncar R
Alumiini	0,896	2700	Koncar R
Ilma 0°C	1,005	1,293	Koncar R

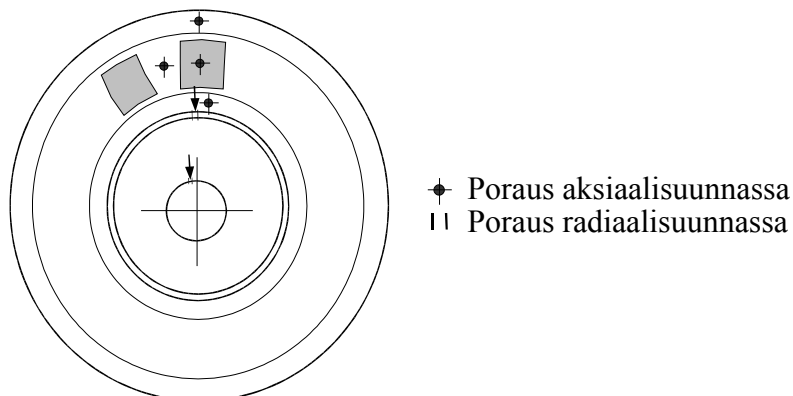
Lämpötilojen mittauspisteet testikoneessa

Termoelementtejä asennettiin moottoriin kaikkiaan 28 kpl. Taulukossa L2.1 on lueteloitu kunkin anturin sijainti. Rungon kolmeen sektoriin porattiin reikiä kuvan L2.1 mukaisesti, joista vietiin elementtien johdot staattorin selkään, sisä- ja ulkovyyhdempäihin, sekä staattorin ja rungon välissä olevaan ilmatilaan. Lisäksi oli anturi kiinnityspalassa sekä keskiön reiässä. Rungon pintaan anturit kiinnitettiin alumiiniteipillä.

Roottorin termoelementit porattiin roottorilevyn läpi magneettiin sekä magneettien väliin alumiiniseen kehyslevyyn kuvan L2.2 mukaisesti. Anturit upotettiin roottorilevyyn ulko- ja sisävyyhdempään kohdalle sekä laakereiden puoliväliin ulkosovitteen. Roottorin anturit yhdistettiin langattomaan 4-kanavaiseen radiolähettimeen, jolla saatiin lämpötilatiedot tietokoneelle kolmen minuutin välein. Vyyhdempäiden kohdalla olevat anturit kytkettiin lähettimeen vuorotellen eri mittauskerroilla. Mittauspisteiden lämpötila todettiin liki samaksi.



Kuva L2.1. Periaatekuva rungon antureiden sijainnista.



Kuva L2.2. Periaatekuva roottorin antureiden sijainnista.

Taulukko L2.1 anturiluettelo

kanava	solmu	Selite
116	AF1	Staattorin ilmasola klo 1
111	CF1	Staattorin ilmasola klo 4
108	DF1	Staattorin ilmasola klo 6
205	AF4	Rungon kehä klo 11
207	RT10	Laakerikeskiö
209	BF2	Kiinnityspalan ruuvi klo 1
1037	RT8	Laakerin ulkokehä roottorissa
1036	RT2	Roottorin magneetti
1035	RT2	Roottorin magneetin kehyslevy
1034	RT4	Roottorilevy ulkokehä, rikki
210	RT6	Roottorilevy sisäkehä
206	DF2	Rungon alareuna klo 6
208	EF4	Rungon jarrun vieressä klo 9
204	AF2	Rungon yläreuna klo 12
118		Staattorin kiinnityspala klo 12
107		Staattorin kiinnityspala klo 7
113	A1	Staattorin selkä klo 1
119	A1	Staattorin selkä klo 12
109	D1	Staattorin selkä klo 6
212		Syöttökaapelin johdin
117	VPi2	VP ilma inner klo 12
112	VPi6	VP ilma inner klo 4
110	VPi8	VP ilma inner klo 6
120	VPo1	VP ilma outer klo 12
102	Vpo4	VP ilma outer klo 3
103	Vpo8	VP ilma outer klo 6
106	VPo9	VP ilma outer klo 7
114	A11	Vyyhdenpää inner klo 1
105	D11	Vyyhdenpää inner klo 7
115	A9	Vyyhdenpää outer klo 1
104	E9	Vyyhdenpää outer klo 7
101	AMB	Ympäristö

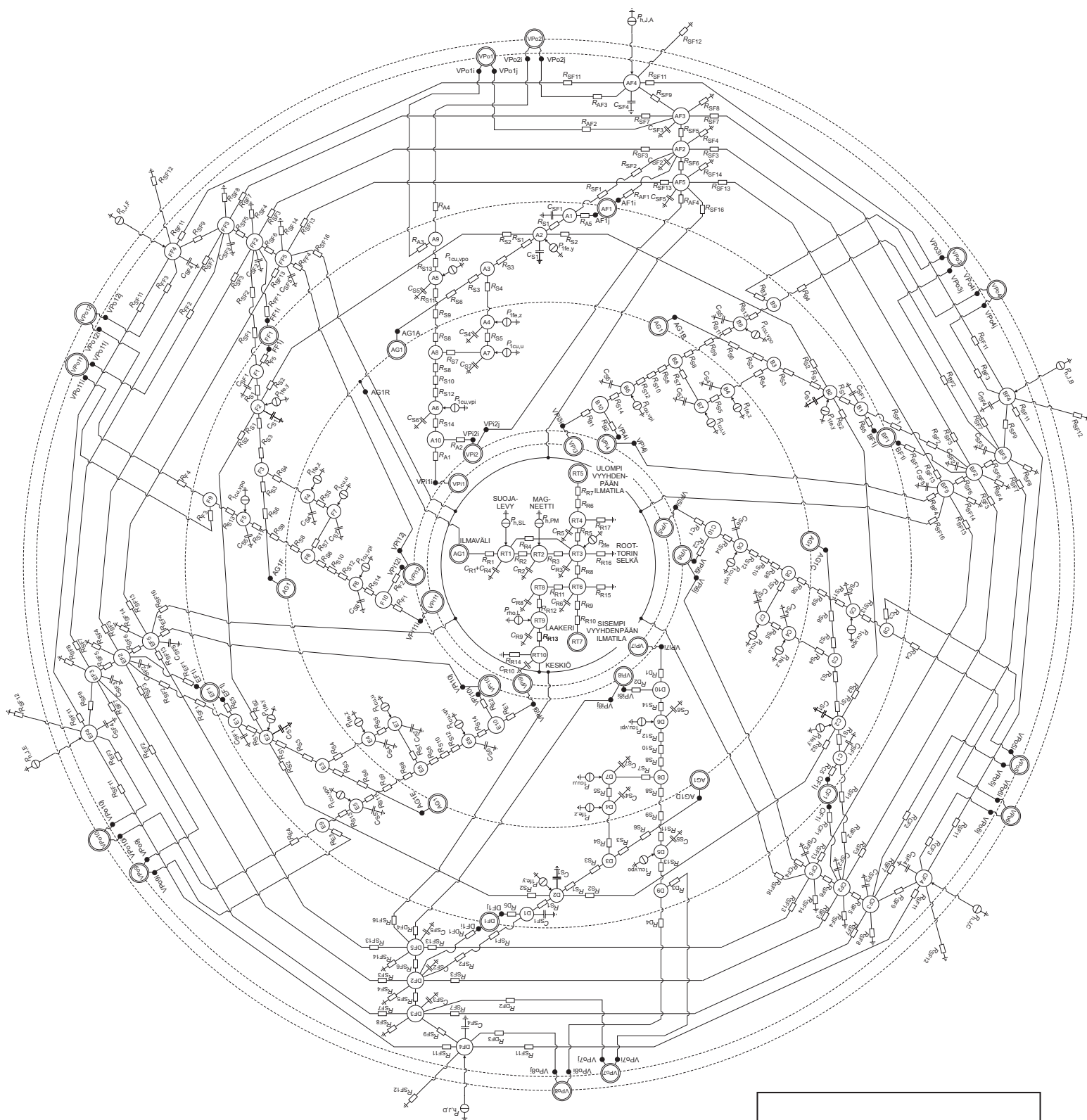
Luettelo lämmönsiirtymiskertoimista

α_{a1}	sisemmän vyyhdenpään pinnasta ilmatilaan roottorin puolelle, A-lohko
α_{a2}	sisemmän vyyhdenpään pinnasta ilmatilaan staattorin puolelle, A-lohko
α_{a3}	ulomman vyyhdenpään pinnasta ilmatilaan roottorin puolelle, A-lohko
α_{a4}	ulomman vyyhdenpään pinnasta ilmatilaan staattorin puolelle, A-lohko
α_{b1}	— // — B -lohko
α_{b2}	— // — B -lohko
α_{b3}	— // — B -lohko
α_{b4}	— // — B -lohko
α_{c1}	— // — C -lohko
α_{c2}	— // — C -lohko
α_{c3}	— // — C -lohko
α_{c4}	— // — C -lohko
α_{d1}	— // — D -lohko
α_{d2}	— // — D -lohko
α_{d3}	— // — D -lohko
α_{d4}	— // — D -lohko
α_{e1}	— // — E -lohko
α_{e2}	— // — E -lohko
α_{e3}	— // — E -lohko
α_{e4}	— // — E -lohko
α_{f1}	— // — F -lohko
α_{f2}	— // — F -lohko
α_{f3}	— // — F -lohko
α_{f4}	— // — F -lohko
α_{r4}	vääpelilevystä roottoriselkään
α_{a1}	alumiinilevyjen välissä
α_{uer}	uraeristuksen kosketus
α_{r7}	roottorista ulompaan vyyhdenpäätilaan
α_{r10}	roottorista sisempään vyyhdenpäätilaan
α_{r14}	laakerikeskiöstä ympäristöön
α_{r15}	roottorin selästä ympäristöön sisäkehä
α_{r16}	roottorin selästä ympäristöön köysipyörä
α_{r17}	roottorin selästä ympäristöön ulkokehä
α_{sf1}	staattorista kiinnityspalaan
α_{sf2}	kiinnityspalasta runkoon

α_{a5} staattorista kiinnityspalojen ilmaväliin, A-lohko
 α_{b5} — // — B -lohko
 α_{c5} — // — C -lohko
 α_{d5} — // — D -lohko
 α_{e5} — // — E -lohko
 α_{f5} — // — F -lohko

α_{af1} kiinnityspalojen ilmavälistä runkoon, A-lohko
 α_{af2} rungosta ulompaan vyyhdenpäätilaan, A-lohko
 α_{af3} rungon kehästä ulompaan vyyhdenpäätilaan, A-lohko
 α_{af4} rungosta sisempään vyyhdenpäätilaan, A-lohko
 α_{bf1} — // — B -lohko
 α_{bf2} — // — B -lohko
 α_{bf3} — // — B -lohko
 α_{bf4} — // — B -lohko
 α_{cf1} — // — C -lohko
 α_{cf2} — // — C -lohko
 α_{cf3} — // — C -lohko
 α_{cf4} — // — C -lohko
 α_{df1} — // — D -lohko
 α_{df2} — // — D -lohko
 α_{df3} — // — D -lohko
 α_{df4} — // — D -lohko
 α_{ef1} — // — E -lohko
 α_{ef2} — // — E -lohko
 α_{ef3} — // — E -lohko
 α_{ef4} — // — E -lohko
 α_{ff1} — // — F -lohko
 α_{ff2} — // — F -lohko
 α_{ff3} — // — F -lohko
 α_{ff4} — // — F -lohko

α_{sf4} rungosta ympäristöön staattorin kohdalta
 α_{sf8} rungosta ympäristöön ulkovyyhdenpään kohdalta
 α_{sf12} rungosta ympäristöön kehältä
 α_{sf14} rungosta ympäristöön keskeltä



Lämpömallin kytkentäkaavio

Tekninen korkeakoulu
7.1.2006 Ari Haavisto